



**TUGAS AKHIR TF-141581**

**ANALISIS PROFIL WAKE DI BELAKANG  
TURBIN ARUS LAUT TIPE *V-BLADE*  
*DARRIEUS* BERBASIS *COMPUTATIONAL*  
*FLUID DYNAMICS***

**ERNA SEPTYANINGRUM**  
NRP. 2411 100 015

Dosen Pembimbing  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT TF-141581**

**AN ANALYSIS OF WAKE BEHIND V-BLADE  
DARRIEUS OCEAN CURRENT TURBINE  
PROFILE BASED ON COMPUTATIONAL  
FLUID DYNAMICS**

**ERNA SEPTYANINGRUM**  
NRP. 2411 100 015

Supervisor  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015

**ANALISIS PROFIL *WAKE* DI BELAKANG TURBIN ARUS  
LAUT TIPE *V-BLADE DARRIEUS* BERBASIS  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**TUGAS AKHIR**

Oleh :

**ERNA SEPTYANINGRUM**

**NRP : 2411 100 015**

**Surabaya, 21 Januari 2015**

**Mengetahui/Menyetujui**

**Pembimbing I ,**



**Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**  
**NIPN. 19761223 200501 21001**

**Pembimbing II ,**



**Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.** 

**Ketua Jurusan  
Teknik Fisika FTI-ITS**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**  
**NIPN. 19650309 199002 1 001**

**ANALISIS PROFIL WAKE DI BELAKANG TURBIN ARUS  
LAUT TIPE V-BLADE DARRIEUS BERBASIS  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi Rekayasa Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ERNA SEPTYANINGRUM**  
**NRP. 2411 100 015**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. .... (Pembimbing I)
2. Nur Laila Hamidah, S.T., MSc. .... (Pembimbing II)
3. Dr. Gunawan Nugroho, S.T, M.T ..... (Penguji I)
4. Ir. Sarwono, M.M ..... (Penguji II)
5. Ir. Rukmono, M.T ..... (Penguji III)

**SURABAYA**  
**JANUARI 2015**



# **ANALISIS PROFIL WAKE DI BELAKANG TURBIN ARUS LAUT TIPE V-BLADE DARRIEUS BERBASIS COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**Nama Mahasiswa** : Erna Septyaningrum  
**NRP** : 2411 100 015  
**Jurusan** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

## **Abstrak**

*Wake merupakan salah satu parameter penting yang perlu dianalisa ketika mendesain suatu array turbin. Pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk menganalisis profil wake di belakang turbin tipe V-Blade Darrieus serta pengaruhnya terhadap performansi turbin yang tersusun dalam suatu array. Terdapat tiga jenis susunan turbin yang disimulasikan, yaitu stand alone turbine (turbin tunggal), array I (susunan sebaris) dan array II (susunan zig-zag) dengan variasi kecepatan arus laut 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s dan 2 m/s. Besarnya gaya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan arus laut. Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa wake terpanjang untuk stand alone turbin adalah 7,5R dan untuk turbin pada array I adalah 8,5R. Pada array II wake terpanjang dihasilkan oleh downstream turbine yaitu 8,5R. Hasil simulasi untuk array I dan array II menunjukkan bahwa array I memiliki efisiensi farm yang lebih besar (1,3%) dari array II (1,1 %). Pada array II, turbin C (turbin downstream) memiliki performansi yang lebih kecil dari pada turbin A,B dan stand alone turbine. Hal ini terjadi karena pengaruh wake dari turbin upstream.*

**Kata kunci** : array, performansi , torsi, V-Blade Darrieus Turbine, wake

# **AN ANALYSIS OF WAKE BEHIND V-BLADE DARRIEUS OCEAN CURRENT TURBINE PROFILE BASED ON COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**Name** : Erna Septyaningrum  
**NRP** : 2411 100 015  
**Department** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Supervisor** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

## **Abstract**

*Wake is one of the important parameters that need to be evaluated when designing a turbine array. This final project is a simulation to analyze the profile wake behind the V-Blade Darrieus turbine and its influence on the performance of the turbine array. There are three types of simulated turbine arrangement, which are stand-alone turbine ( single turbine ), the array I ( row arrangement ) and the array II ( zig-zag arrangement ) with the variation of ocean current velocity of 0.5 m / s ; 1 m / s ; 1.5 m / s and 2 m / s. The amount of force and torque generated by the turbine increases with increasing speed of ocean currents. From the simulation results can be seen that the longest wake for stand alone turbines are 7,5R and for array I is 8,5R. In the array II, the longest wake is produced by downstream turbine (8,5R). The simulation results shows that the array I (1,3%) have farm efficiency greater than the array II (1,1%). In the array II, turbine C ( turbine downstream) has smaller performance of the turbine A , B and stand alone turbine. This occurs due to the influence of the turbine upstream wake.*

**Keywords** : array , performance , torque , V -Blade Darrieus Turbine , wake

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir “Analisis Profil Wake di Belakang Turbin Arus Laut Tipe *V-Blade Darrieus* Berbasis *Computational Fluid Dynamics*”.

Selama melaksanakan tugas akhir dan menuliskan laporan tugas akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika, Intitut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan petunjuk dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak Ir. Agung Budiono, M.Eng selaku Dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan dan ilmu-ilmunya kepada penulis.
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T dan Ibu Nur Laila Hamidah, S.T, M.Sc selaku dosen pembimbing senantiasa memberikan bimbingan, motivasi dan saran dalam penyelesaian tugas akhir ini
4. Bapak Ir. Sarwono, MMT, selaku KBM Energi serta kepala Laboraturium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah memberikan dukunganya kepada penulis.
5. Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dan bimbinganya selama penulis menuntut ilmu di Jurusan Teknik Fisika ITS.
6. Susilo dan Mecha Garindra G selaku peneliti sebelumnya yang telah memberikan ilmu, arahan dan saran sama penulis melaksanakan tugas akhir ini
7. Bapak Suwandi, Ibu Rukmini, Diah Ayu Sekarrini serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, motivasi dan doa



8. Siti Nur Fitria, I Kadek Yamuna Gangga Putra, Dwi Ganef Janesa, Ramadhania Koestanti, Rendy K, Muhmmad Faisal dan teman-teman seperjuangan dalam mengerjakan tugas akhir bidang energi yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Teman-teman Kelompok Studi Energi (KSE) : Husnul, Buma, Alvien Kurniawan, Alvin Murad, Reza, Abdi, Zain Alfani, Elfa, mas Umam dan lain-lain
10. Teman-teman asisten Laboraturium Simulasi dan Komputasi: Dhikri, Masbi, Nico, Mas Kharim dan lain-lain
11. Sahabat-sahabat penulis : Mariesta, Uyun, Evita, Siti Sulikhah, Isti, Rinda, Mega, Ninim, Umi, Yusnia, Wilujeng, Ayu, Elok, Mbak Zharin, Mbak Atul, Ika, Yoshua, Khamim, Sayyidah, Jakur dan lain-lain atas motivasi yang senantiasa diberikan kepada penulis.
12. Serta teman-teman 2011, 2012 dan 2013 lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
13. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Laporan tugas akhir ini

Apabila terdapat kekurangan, penulis memohon kritik dan saran demi kesempurnaan laporan kerja praktek ini. Semoga laporan kerja praktek ini dapat memberikan manfaat dan ilmu bagi banyak orang.

Surabaya, 2 Januari 2015

Penulis



## DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	v
Abstract	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SIMBOL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Energi Hidrokinetik	5
2.2 Turbin Tipe Darrieus	8
2.3 Aerodinamika <i>Blade</i>	11
2.4 Aerodinamika Wake	15
2.5 Array Turbin	18
2.6 SST	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Prediksi Kecepatan Turbin	22
3.3 Pembuatan Geometri Turbin <i>V-Blade</i>	25
3.4 <i>Meshing</i>	28
3.5 Pre-Processing dan Processing	29
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Validasi Hasil Simulasi	31
4.1.1 Validasi Kecepatan Rotasi Turbin	31
4.1.2 Validasi <i>Boundary Condition</i> dan <i>Meshing</i>	33

4.2 Turbin Tunggal ( <i>Stand Alone Turbine</i> )	35
4.2.1 Torsi dan Gaya untuk Turbin Tunggal ( <i>Stand Alone Turbine</i> )	35
4.2.2 Profil <i>Wake</i> untuk Turbin Tunggal ( <i>Stand Alone Turbine</i> )	37
4.3 Desain <i>Array</i> I	40
4.3.1 Torsi dan Gaya untuk Desain <i>Array</i> I	41
4.3.2 Profil <i>Wake</i> untuk Desain <i>Array</i> I	43
4.4 Desain <i>Array</i> II	46
4.4.1 Torsi dan Gaya untuk Desain <i>Array</i> II	47
4.4.2 Profil <i>Wake</i> untuk Desain <i>Array</i> II	49
4.5 Diskusi	51
BAB V PENUTUP	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN A Torsi yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 0,5 m/s	A-1
LAMPIRAN B Gaya yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 0,5 m/s	B-1
LAMPIRAN C Torsi yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 1 m/s	C-1
LAMPIRAN D Gaya yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 1 m/s	D-1
LAMPIRAN E Torsi yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 1,5 m/s	E-1
LAMPIRAN F Gaya yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 1,5 m/s	F-1
LAMPIRAN G Torsi yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 2 m/s	G-1
LAMPIRAN H Gaya yang dihasilkan oleh <i>Stand alone turbine</i> pada kecepatan arus 2 m/s	H-1

LAMPIRAN I Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 0,5 m/s	I-1
LAMPIRAN J Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 0,5 m/s	J-1
LAMPIRAN K Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 1 m/s	K-1
LAMPIRAN L Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 1 m/s	L-1
LAMPIRAN M Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 1,5 m/s	M-1
LAMPIRAN N Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 1,5 m/s	N-1
LAMPIRAN O Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 2 m/s	O-1
LAMPIRAN P Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array I</i> pada kecepatan arus 2 m/s	P-1
LAMPIRAN Q Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 0,5 m/s	Q-1
LAMPIRAN R Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 0,5 m/s	R-1
LAMPIRAN S Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 1 m/s	S-1
LAMPIRAN T Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 1 m/s	T-1
LAMPIRAN U Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 1,5 m/s	U-1
LAMPIRAN V Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 1,5 m/s	V-1
LAMPIRAN W Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 2 m/s	W-1
LAMPIRAN X Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array II</i> pada kecepatan arus 2 m/s	X-1
BIODATA PENULIS	



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tabel hubungan kecepatan putaran turbin dan kecepatan arus air pada penelitian sebelumnya (Gunawan, 2014)	23
Tabel 3.2 Tabel hubungan kecepatan rotasi turbin dan kecepatan aliran arus hasil ekstrapolasi	24
Tabel 3.3 Tabel hubungan kecepatan rotasi turbin dan kecepatan aliran arus hasil analisa dimensional	25
Tabel 3.4. Ukuran Turbin	25
Tabel 3.5. Kondisi Batas	30
Tabel 4.1. Tabel perbandingan hasil eksperimen dan hasil ekstrapolasi	33
Tabel 4.2. Tabel Perbandingan torsi hasil simulasi tugas akhir dengan penelitian sebelumnya	34
Tabel 4.3. Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array I</i>	43
Tabel 4.4. Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array II</i>	49

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prediksi kapasitas energi hidrokinetik dunia (Guney, 2011)	5
Gambar 2.2 <i>Outline</i> sistem konversi energi hidrokinetik dengan menggunakan turbin (Khan, et al., 2009)	6
Gambar 2.3 Turbin <i>Straigh-Blade Darrieus</i> (Hassan, et al., 2012)	10
Gambar 2.4 Turbin <i>V-Blade Darrieus</i> (Erwandi, et al., 2014)	10
Gambar 2.5 <i>Stream line</i> yang terjadi di sekeliling <i>blade</i> pada <i>angle of attack</i> yang berbeda (Bartl, 2011)	11
Gambar 2.6. Skematik <i>angle of attack</i> untuk vertikal turbin (Birjandi, 2012)	12
Gambar 2.7. Untuk turbin sumbu vertikal (a) <i>angle of attack</i> sebagai fungsi TSR dan sudut azimuth, (b) azimuth dimana <i>angle of attack</i> maksimal terjadi TSR tertentu (Birjandi, 2012)	13
Gambar 2.8. Gaya yang bekerja pada <i>blade</i> (Birjandi, 2012)	14
Gambar 2.9. Efek <i>stall</i> pada (a) koefisien <i>lift</i> NACA 0012 dan (b) koefisien <i>drag</i> NACA 0012 (Birjandi, 2012)	14
Gambar 2.10. Pembentukan <i>Tip Vortex</i> (Bartl, 2011)	16
Gambar 2.11. <i>Vortex</i> sistem pada <i>finite wing</i> (Sanderse, 2009)	17
Gambar 2.12. Proses pencampuran turbulensi pada <i>wake</i> di belakang turbin (Sanderse, 2009)	17
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	21
Gambar 3.2 Grafik hubungan kecepatan sudut turbin dan kecepatan aliran air	23
Gambar 3.3. Turbin <i>V-Blade Darrieus</i>	26
Gambar 3.4. Domain Tabung	26
Gambar 3.5. Domain laut	27
Gambar 3.6. <i>Array I</i> (susunan sejajar)	27
Gambar 3.7. <i>Array II</i> (susunan <i>zig-zag</i> )	28
Gambar 3.8. Contoh hasil meshing	29
Gambar 4.1. Grafik Hubungan Kcepatan air dan Kecepatan Rotasi Turbin	32
Gambar 4.2. Grafik Hubungan Torsi dan Sudut Azimuth untuk <i>Stand Alone Turbine</i> Kecepatan Air 0,5 m/s	35

Gambar 4.3. Grafik Hubungan Gaya dan Sudut Azimuth untuk <i>Stand Alone Turbine</i> Kecepatan Air 0,5 m/s	36
Gambar 4.4. Grafik Hubungan Torsi dan Kecepatan Aliran Air	36
Gambar 4.5. Grafik Hubungan Gaya dan Kecepatan Aliran Air	37
Gambar 4.6. Profil <i>Wake Stand Alone Turbine</i> untuk Kecepatan arus laut : (a) 0,5 m/s; (b) 1 m/s; (c) 1,5 m/s; (d) 2 m/s	40
Gambar 4.7. Skema konfigurasi <i>array</i> I	41
Gambar 4.8. Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array</i> I untuk kecepatan 0,5 m	42
Gambar 4.9. Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array</i> I untuk kecepatan 0,5 m/s	42
Gambar 4.10. Profil <i>Wake Array</i> I untuk Kecepatan Aliran arus laut: (a) 0,5 m/s; (b) 1 m/s; (c) 1,5 m/s; (d) 2 m/s	45
Gambar 4.11. Skema konfigurasi <i>array</i> II	47
Gambar 4.12. Torsi yang dihasilkan oleh <i>Array</i> II untuk kecepatan 0,5 m/s	48
Gambar 4.13. Gaya yang dihasilkan oleh <i>Array</i> II untuk kecepatan 0,5 m/s	48
Gambar 4.14. Profil <i>Wake Array</i> II untuk Kecepatan arus laut: (a) 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s; (d) 2 m/s	51
Gambar 4.15. Hubungan Kecepatan dan Torsi	52
Gambar 4.16. Gaya yang dihasilkan <i>Stand alone turbine</i> selama berputar	53
Gambar 4.17. Hubungan Kecepatan Arus Laut dan Panjang wake	54
Gambar 4.18. Grafik Hubungan Waktu Putar Turbin dan Panjang <i>Wake</i>	55
Gambar 4.19. Grafik Hubungan Waktu Putar Turbin dan Panjang Interaksi Aliran di Samping Turbin	56
Gambar 4.20. Profil Penurunan Kecepatan (a) <i>Stand Alone Turbin</i> , (b) <i>Array</i> I, (c) <i>Array</i> II	60



## DAFTAR SIMBOL

$\alpha$	<i>Local angle of attack</i>
$\alpha_p$	Desain <i>angle of attack</i>
$\theta$	Sudut Azimuth
$\lambda$	<i>Tip speed ratio</i>
$\rho$	Massa Jenis
$\omega$	Kecepatan Rotasi Turbin
$\omega_s$	Kecepatan rotasi turbin 1
$\omega_v$	Kecepatan rotasi turbin 2
$\eta$	Efisiensi <i>farm</i>
$\Delta F$	<i>Total Strength</i>
$A$	Luas sapuan turbin
$C_D$	Koefisien <i>Drag</i>
$C_l$	Koefisien <i>lift</i>
$C_N$	Koefisien gaya normal
$C_{PE}$	Koefisien daya
$C_T$	Koefisien gaya tangensial
$D$	Diameter turbin
$F_D$	Gaya <i>Drag</i>
$F_l$	Gaya <i>lift</i>
$F_N$	Gaya Normal
$F_T$	Gaya tangensial
$N$	Jumlah turbin dalam <i>array</i>
$P$	Daya yang mampu diekstrak turbin
$P_{farm}$	Daya <i>farm</i>
$P_i$	Daya yang dihasilkan masing-masing turbin dalam <i>Array</i>
$P_{ref. farm}$	Daya referensi
$P_s$	Daya <i>stand alone turbine</i>

$R$

$R_s$

$R_v$

$T$

$v$

Jari-jari turbin

Jari-jari turbin 1

Jari-jari turbin 2

Torsi

kecepatan fluida

## DAFTAR PUSTAKA

- Asmus, P. & Wheelock, C., 2009. *Hydrokinetic and Ocean Energy*.
- Bai, L., Spence, R. R. G. & Dudziak, G., 2009. *Investigation of The Influence of Array Arrangement and Spacing on Tidal Energy Converter (TEC) Performance using a 3-Dimensional CFD Model*. Sweden, s.n.
- Bartl, J., 2011. Wake Measurements Behind an Array of Two Model Wind Turbines.
- Bastankhah, M. & Porte-Agel, F., 2014. A New Analytical Model for Wind-Turbine Wake. *Renewable Energy*, Volume 70, pp. 116-123.
- Bhutta, M. M. A. et al., 2012. Vertical Axis Wind Turbine - A Review of Various Configurations and Design Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, pp. 1926-1939.
- Birjandi, A. H., 2012. Effect of Flow and Fluid Structure on the Performance of Vertical River Hydrokinetic Turbines. pp. 2-5.
- Erwandi, et al., 2014. *Rancang Bangun Prototipe Wave-Current Rotor Converter untuk Konversi Energi Kinetik Arus Laut dan Energi Potensial Gelombang Laut Menjadi Energi Listrik*, Surabaya: s.n.
- Funke, S., Farrell, P. & Piggott, M., 2014. Tidal Turbine Array Optimisation Using The Adjoint Approach. *Renewable Energy*, Volume 63, pp. 658-673.
- Gunawan, M. G. A., 2014. *Studi Eksperimental Mekanisme Passive-Pitch dengan Flapping Wing pada Turbin Vertikal Aksis Tipe Darrieus*, Surabaya: s.n.
- Guney, S. M., 2011. Evaluation and Measures to Increase Performance Coefficient of Hydrokinetic Turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, pp. 3669-3675.
- Gurney, M. & Kaygusuz, K., 2010. Hydrokinetic Energy Conversion System: A Technology Status Review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, Volume 14, pp. 2996-3004.
- Hassan, H. F., El-Shafie, A. & Karim, O. A., 2012. Tidal Current Turbines Glance at The Past and Look Into Future Prospect in



- Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, pp. 2707-2717.
- Jo, C.-H., Lee, J.-H., Rho, Y.-H. & Lee, K.-H., 2014. Performance Analysis of a HAT Tidal Current Turbine and Wake Flow Characteristics. *Renewable Energy*, Volume 65, pp. 175-182.
- Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M. & Quaicoe, J., 2009. Hydrokinetic Energy Conversion System and Assesment of Horizontal and Vertical Axis Turbine for River and Tidal Application: A Technology Status Review. *Applied Energy*, Volume 86, pp. 1823-1835.
- Lago, L., Ponta, F. & Chen, L., 2010. Advances and Trends in Hydrokinetic Turbine Systems. *Energy for Sustainable Development*, Volume 14, pp. 287-296.
- Li, Y., 2014. On The Definition of The Power Coefficient of Tidal Current Turbines and Efficiency of Tidal Current Turbine Farms. *Renewable Energy*, Volume 68, pp. 868-875.
- Lubis, S. & Yuningsih, A., 2011. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan*.
- Menter, F., Ferreira, J. C., Esch, T. & Konno, B., 2003. *The SST Turbulence Model with Improved Wall Treatment for Heat Transfer Predictions in Gas Turbines*. Tokyo, GTSJ.
- Menter, F., Kuntz, M. & Langtry, R., 2003. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Volume 4.
- Paraschivoiu, I., 2002. *Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept*. 1st penyunt. Canada: National Library of Canada.
- Sanderse, B., 2009. Aerodynamics of Wind Turbine Wakes. *Energy Research Center of the Netherlands*.
- Susilo, 2014. *Simulasi Mekanisme Passive-Pitch dengan Flapping Wing pada Turbin Vertikal Aksis Arus Sungai Jenis Darrieus Straight-Blade Berbasis CFD*, Surabaya: s.n.
- Syed, S., Liang, Z., Qi-hu, S. & Xue-Wei, Z., 2013. Difference Between Fixed and Variable Pitch Vertical Axis Tidal Turbine-Using CFD Analysis in CFX.

- Tescione, G. et al., 2014. Near Wake Flow Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine by Stereoscopic Particle Image Velocimetry. *Renewable Energy*, Volume 70, pp. 47-61.
- Vennell, R. et al., 2015. Designing Large Arrays of Tidal Turbines : A Synthesis and Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 41, pp. 454-472.
- Winchester, J. & Quayle, S., 2009. *Torque Ripple and Variable Blade Force: A Comparison of Darrieus and Gorlov-type Turbines for Tidal Stream Energy Conversion*. Uppsala, s.n.
- Xiao, H., Duan, L., Sui, R. & Rosgen, T., 2013. *Experimental Investigations of Turbulent Wake Behind Porous Disks*. Washington DC, s.n.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Rembang, Jawa Tengah pada tanggal 25 September 1992. Tamat SD N Leteh III (2005), SMP N 2 Rembang (2008) dan SMA N 1 Rembang (2011). Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan studinya ke jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan adalah Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, serta Bidang Minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol. Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam beberapa organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika pada periode 2012-2013 dan 2013-2014. Penulis juga bergabung dalam OSA-ITS *Student Chapter*. Pada kegiatan akademik, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Pengalaman *internship* yang dimiliki penulis dilakukan di PT. Pertamina *Geothermal Energy Area* Kamojang, khususnya di PLTP unit IV. Pada program *internship* tersebut, penulis melakukan analisis aliran yang melalui *steam venting* dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics*. Penulis dapat dihubungkan melalui alamat email [erna.septya@gmail.com](mailto:erna.septya@gmail.com)

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Isu mengenai krisis energi merupakan salah satu topik yang sering diperbincangkan saat ini. Banyak penelitian dilakukan untuk menggantikan sumber bahan bakar fosil yang akan habis. Berbagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan mulai dikembangkan, seperti *geothermal*, *hydropower*, angin, ombak, biomassa dan sinar matahari (Syed, et al., 2013). Mengingat hamper 2/3 wilayah Indonesia adalah lautan, maka teknologi *hydropower* merupakan salah satu teknologi potensial untuk dikembangkan. Sangat disayangkan apabila potensi ini tidak dimanfaatkan secara maksimal. Salah satu yang potensial adalah penggunaan arus laut sebagai pembangkit listrik. Kecepatan arus diperairan Indonesia cukup tinggi. Beberapa wilayah seperti Bali, Lombok dan Nusa Tenggara memiliki kecepatan arus mencapai 2,5 – 3,4 m/s (Lubis & Yuningsih, 2011). Beberapa negara mulai menerapkan teknologi turbin untuk mengekstrak energi arus laut ini, seperti instalasi turbin *SeaGen* di Irlandia Utara, AK1000 di Skotlandia dan *EnCurrent Generation System* (Hassan, et al., 2012).

Terdapat beberapa jenis turbin yang dapat digunakan untuk mengekstrak energi dari arus laut. Untuk kecepatan aliran yang tidak terlalu besar seperti di Indonesia, lebih baik digunakan VAT (*Vertical Axis Turbine*). Salah satu kelebihan VAT adalah *omni-directional*, yang artinya turbin jenis ini mampu menerima angin dari segala arah. VAT tidak memerlukan mekanisme *yaw* dan menghasilkan *noise* yang rendah. VAT turbin yang memiliki efisiensi terbesar adalah tipe *Darrieus* (Bhutta, et al., 2012).

Turbin *Darrieus* cocok digunakan untuk perairan dangkal dengan kecepatan aliran air yang kecil. Turbin ini merupakan *lift device*, karena menggunakan gaya *lift* untuk berputar. *Lift device* memiliki efisiensi yang lebih besar daripada *drag device*. Torsi yang dihasilkan oleh VAT mengalami fluktuasi sehingga dapat menyebabkan munculnya fibrasi (Winchester & Quayle, 2009).

Fluktuasi torsi ini juga akan berpengaruh pada terjadi fluktuasi profil *wake* (olakan) yang terbentuk di belakang turbin ketika turbin berputar. Kecepatan pada daerah *wake* lebih kecil dari kecepatan pada daerah sekelilingnya, hal ini terjadi akibat proses ekstraksi energi oleh turbin (Bartl, 2011).

*Wake* merupakan salah satu permasalahan yang perlu dianalisa ketika melakukan penelitian mengenai turbin, baik untuk turbin arus laut maupun turbin angin. Analisis mengenai *wake* sangat penting dilakukan terutama untuk tujuan pemasangan susunan turbin (*array turbine*). Panjang *wake* menentukan jarak pemasangan antar turbin. Untuk meningkatkan efisiensi, sebaiknya jarak antar turbin minimal sepanjang *wake* turbin *upstream*. Turbin pada bagian *downstream* akan mengalami gangguan akibat *wake* yang dihasilkan oleh turbin pada bagian *upstream*. Turbin *downstream* memperoleh kecepatan arus yang lebih rendah daripada bagian *upstream*. Hal ini terjadi karena telah terjadi ekstraksi energi pada turbin *upstream*. Sehingga terjadi penurunan energi dan momentum aliran arus laut. *Wake* merupakan salah satu penyebab *power loss* pada *ocean current farm* (Bastankhah & Porte-Agel, 2014). Selain itu, pemasangan turbin yang terlalu dekat dengan dasar laut dapat menyebabkan perubahan morfologi dan sedimentasi. Akibatnya, akan terjadi perubahan ekosistem bawah laut (Xiao, et al., 2013).

Sebelumnya telah dilakukan beberapa penelitian mengenai *wake*. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh G. Tescione, dkk. Penelitian ini membahas daerah *near wake* dibelakang *vertical axis wind turbine* (VAWT). Untuk mengetahui struktur *near wake* ini, digunakan *stereoscopic particle image velocimetry* (Tescione, et al., 2014). Selain itu, terdapat penelitian lain yang dilakukan oleh S.W Funke dkk membahas mengenai optimalisasi *tidal array turbine*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan konfigurasi turbin yang optimal sehingga dapat mengekstrak energi secara optimal (Funke, et al., 2014).



## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan belakang diatas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana profil *wake* di belakang turbin tunggal maupun *array* turbin?
- b. Bagaimana efek *wake* terhadap performansi turbin?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Turbin yang digunakan dalam penelitian ini adalah *V-Blade Vertical Axis Turbine tipe Darrieus*
- b. Simulasi untuk mengetahui profil aliran *wake* dilakukan dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD)
- c. *Airfoil* yang digunakan adalah seri NACA 0018
- d. Jumlah *blade* yang digunakan dalam simulasi ini adalah 3 buah dengan *aspec ratio* 8.

## 1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan diatas, maka tujuan dilaksanakannya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui profil *wake* di belakang turbin tunggal maupun *array* turbin
- b. Mengetahui efek *wake* terhadap performansi turbin.

## 1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini tersusun dari 5 bab dengan rincian sebagai berikut:

### BAB I PENDAHULUAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai latar belakang dilakukannya tugas akhir, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan serta sistematika penulisan laporan.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab II dijelaskan beberapa teori singkat yang mendasari tugas akhir ini. Beberapa teori singkat yang dijelaskan pada bab ini adalah sebagai berikut: *Hydrokinetic Energy*, turbin tipe *Darrieus*, aerodinamika *blade*, aerodinamika *wake*, *array* turbin dan SST

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bagian ini dijelaskan mengenai tahapan-tahapan pelaksanaan tugas akhir secara jelas. Bab III juga menyajikan tahapan pembuatan simulasi (cara pembuatan geometri, meshing, *preprocessing*, *processing* dan *postprocessing*) serta kondisi-kondisi yang diberikan ketika simulasi hingga diperoleh hasil yang sesuai.

## **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bagian awal bab IV, disajikan proses validasi data yang dilakukan untuk mengetahui nilai eror. Selanjutnya dilakukan analisa data yang diperoleh dari hasil simulasi. Beberapa hal yang dibahas pada bab ini adalah sebagai berikut : torsi yang dihasilkan oleh turbin tunggal, profil *wake* turbin tunggal, torsi yang dihasilkan oleh *array* I dan II, serta profil *wake* dibelakang *array* I dan II.

## **BAB V PENUTUP**

Bab V merupakan bagian akhir dari bab utama dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Bab V berisikan kesimpulan yang menjawab tujuan tugas akhir serta saran yang diberikan oleh peneliti. Dengan adanya saran ini, diharapkan penelitian selanjutnya dapat lebih baik dan mampu memberikan dampak yang besar terhadap perkembangan teknologi.

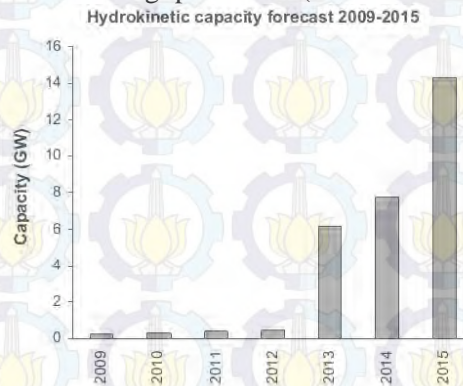


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Energi Hidrokinetik

Peningkatan jumlah penduduk dunia yang pesat, menyebabkan peningkatan jumlah kebutuhan energi yang cukup besar. Sebagai besar kebutuhan energi dunia dipasok oleh sumber energi fosil yang jumlahnya terus mengalami penurunan. Penggunaan energi fosil ini menimbulkan berbagai masalah lingkungan. Pada proses pembakaran energi fosil menjadi bentuk energi lain mengemisikan gas CO<sub>2</sub>, gas ini merupakan salah satu penyebab terjadinya *global warming*. Untuk mengatasi hal tersebut, berbagai penelitian dilakukan guna mencari sumber energi baru terbarukan. Beberapa energi baru terbarukan yang saat ini sedang dikembangkan adalah energi hidro, angin, *photovoltaic* (PV), biomassa, *geothermal* (Gurney & Kaygusuz, 2010). Namun, dari berbagai sumber energi tersebut, angin dan energi hidro merupakan energi yang paling optimum untuk dikembangkan. Terdapat lima jenis utama energi hidro dan energi laut yang saat ini banyak dikembangkan. Kelima energi tersebut adalah gelombang laut, *tidal stream*, energi hidrokinetik sungai, energi arus laut dan energi panas laut (Asmus & Wheelock, 2009)



**Gambar 2.1** Prediksi kapasitas energi hidrokinetik dunia (Gurney, 2011)



Hidrokinetik energi merupakan salah satu bentuk energi baru terbarukan yang potensial untuk dikembangkan. Menurut Guney, potensi energi hidrokinetik dunia diprediksi mencapai kapasitas 14 GWatt (Guney, 2011). Prediksi kapasitas energi hidrokinetik dunia dapat dilihat pada gambar 2.1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa potensi energi hidrokinetik terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Hal ini tidak terlepas dari semakin banyaknya penelitian yang mengembangkan jenis energi ini.

Konfersi energi hidrokinetik menjadi energi listrik sangat bergantung pada kecepatan air, massa jenis dan luas penampang. Terdapat dua cara yang digunakan untuk mengekstrak energi hidrokinetik, yaitu dengan menggunakan sistem turbin dan tanpa menggunakan sistem turbin. *Flutter vane*, *piezoelectric*, *vortex induced vibration*, *oscillating hydrofoil* dan *sails* merupakan beberapa contoh cara konfersi energi hidrokinetik tanpa menggunakan sistem turbin. Sedangkan contoh konfersi dengan menggunakan turbin adalah dengan menggunakan turbin sumbu vertikal, turbin sumbu horizontal, *cross-flow* turbin, *venture* dan *gravitational vortex* (Khan, et al., 2009). Gambar 2.2 menunjukkan sistem konfersi energi hidrokinetik menjadi listrik dengan menggunakan turbin.



**Gambar 2.2** Outline sistem konversi energi hidrokinetik dengan menggunakan turbin (Khan, et al., 2009)



Sama seperti turbin angin, besarnya energi yang mampu diekstrak oleh alat-alat pengeksrak energi hidrokinetik bergantung pada kecepatan aliran air. Hal ini sesuai dengan persamaan :

$$P = C_{PE} \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad 2.1$$

Dimana P merupakan energi air yang mampu diekstrak oleh turbin,  $\rho$  merupakan massa jenis air, A merupakan luas sapuan turbin dan  $v$  merupakan kecepatan aliran fluida. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa besarnya energi yang mampu diekstak oleh turbin atau *device* lain sangat bergantung pada kecepatan aliran fluida. Tidak semua energi air dapat diekstrak oleh turbin atau *device* lain. Beberapa energi hilang karena terjadinya disipasi energi seperti yang telah dinyatakan dalam hukum Betz. Berdasarkan prakteknya, besarnya nilai  $C_{PE}$  mencapai 35% (Lago, et al., 2010)

Teknologi *hydropower* mulai banyak dikembangkan. Sebanyak 3 pembangkit yang dioperasikan secara komersial di EU, Perancis dan Inggris memiliki kapasitas terinstal sebesar 260 MW. Selain tiga negara tersebut, beberapa negara lain seperti Kanada, Argentina, Australia Timur, dan Korea juga memiliki potensi yang baik untuk mengembangkan teknologi ini. Beberapa wilayah diluar Eropa yang memiliki potensi untuk mengaplikasikan teknologi *hydropower* adalah Asia Tenggara, pantai barat dan timur Kanada (Guney, 2011)

Pada April 2008, dilakukan instalasi prototipe *SeaGen* turbin di Strangford Lough, Irlandia Utara. Turbin ini mampu memasok 150 Kw listrik ke jaringan listrik setempat untuk pertama kalinya pada tanggal 17 Juli 2008. Namun pada awalnya terjadi beberapa gangguan pada *blade* sehingga dilakukan penggantian dan perbaikan. Pada Desember 2008, turbin ini mampu menghasilkan energi listrik sebesar 1,2 MW pada kapasitas penuh. Selain *SeaGen*, jenis turbin lain yang disebut AK1000 juga dikembangkan oleh *Atlantis Resource*. Turbin ini memiliki tinggi 18 m dan mampu menghasilkan listrik sebesar 1 MW, yang cukup untuk memenuhi kebutuhan listrik 1000 rumah. AK1000 akan dipasang di *European Marine Energy Centre*, Orkney,



Skotlandia. Kedua turbin diatas merupakan turbin jenis horisontal aksis. Contoh turbin vertikal aksis yang digunakan untuk *Hydropower* adalah *EnCurrent Generation System* yang dibangun berdasarkan turbin angin tipe *Darrieus*. Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa turbin jenis ini mampu menghasilkan energi sebesar 5 MW (Hassan, et al., 2012).

Produksi energi listrik dengan dari energi hidrokinetik memang tidak menghasilkan emisi gas yang berbahaya. Namun, proses produksi ini dapat menyebabkan beberapa efek buruk terhadap lingkungan, terutama lingkungan bawah air. Beberapa efek yang ditimbulkan ini adalah sebagai berikut :

- a. dapat merusak habitat dari berbagai populasi bawah laut,
- b. *array* sistem konfersi energi yang besar dapat menyebabkan *noise* yang akan mempengaruhi kehidupan bawah air,
- c. alat konfersi dapat menghalangi pergerakan hewan-hewan air,
- d. pembuatan sistem dan kanal dapat mengubah kontur bawah laut dan hidrologinya,

Beberapa hal yang dapat dilakukan untuk menghindari efek buruk ini adalah pemilihan lokasi yang tepat, desain alat yang tepat serta usaha pencegahan (Gurney & Kaygusuz, 2010). Penelitian lebih lanjut sangat diperlukan untuk meningkatkan performansi dari sistem konfersi energi hidrokinetik dan untuk mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan.

## 2.2 Turbin Tipe Darrieus

Berbagai cara dapat dilakukan untuk mengektrak energi arus laut menjadi listrik. Salah satunya adalah dengan menggunakan turbin. Turbin merupakan cara yang paling efektif untuk mengekstrak energi arus laut. Secara garis besar, turbin dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *Horizontal Axis Turbine* (HAT) dan *Vertical Axis Turbine* (VAT). HAT menangkap energi menggunakan rotor tipe propeller. HAT memiliki sumbu rotasi yang paralel dengan arah datangnya arus air. Sedangkan VAT memiliki sumbu rotasi yang tegak lurus dengan arah datangnya air.

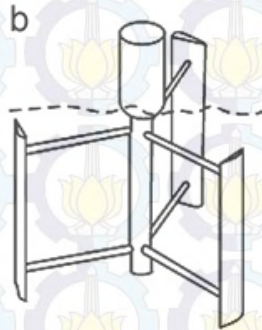


Kedua jenis turbin ini efektif untuk mengekstraksi energi air. Namun beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa HAT memiliki efisiensi yang lebih besar dari VAT. HAT merupakan jenis turbin yang mampu berputar ketika dikenai air dengan kecepatan yang besar. Bentuk geometri HAT hanya mampu mengekstrak energi dari satu arah datang air. Oleh karena itu perlu mekanisme ekor (*tail mechanism*) yang digunakan untuk memutar rotor HAT agar mengarah pada arah datangnya air. Selain itu, HAT memerlukan mekanisme *yaw control* untuk mengurangi pengaruh anggukan turbin yang dapat mengakibatkan kegagalan struktur dan kerusakan.

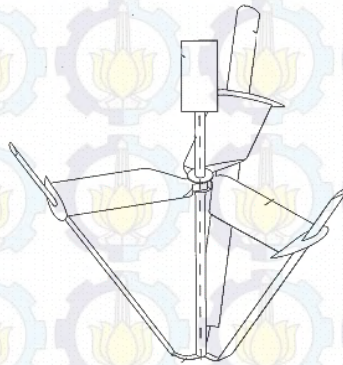
Sementara itu VAT merupakan jenis turbin yang mampu mengekstrak energi dari segala arah, sehingga tidak diperlukan ekor untuk memutar turbin ke arah datangnya arus air. VAT juga tidak memerlukan mekanisme *yaw control*. Saat ini, banyak peneliti mulai mengembangkan turbin jenis VAT.

VAT dibedakan menjadi dua, yaitu *lift device* dan *drag device*. *Drag device* menggunakan gaya *drag* untuk memutar turbin, contohnya adalah turbin jenis *Savonius*. Sementara itu, *Lift device* menggunakan gaya *lift* untuk memutar turbin, contohnya adalah turbin jenis *Darrieus*.

Turbin jenis *Darrieus* pertama dipatenkan pada tahun 1931. Jenis turbin ini pertama diperkenalkan oleh seorang ilmuwan Perancis bernama George Jean Marie Darrieus, turbin yang dipatenkan merupakan turbin jenis *curved bladed* dan *straight blade* VAWT. Turbin *Darrieus* memiliki efisiensi yang paling besar diantara jenis VAT yang lain. Terdapat berbagai macam jenis turbin *Darrieus*, yaitu *Egg – beater*, *Giromill (Straight Bladed)*, *Variable geometry oval trajectory (VGOT)*, *Darrieus-Masgroue (two-tier) rotor*, *Twisted three bladed*, dan *Crossflex* (Bhutta, et al., 2012). Selain itu, beberapa peneliti mulai mengembangkan turbin *Darrieus* jenis baru, yaitu *V-Blade Darrieus*. Gambar 2.3 menunjukkan turbin *Straigh-Blade Darrieus*. Sementara itu Gambar 2.4 menunjukkan turbin *V-Blade Darrieus*.



**Gambar 2.3** Turbin *Straigh-Blade Darrieus* (Hassan, et al., 2012)



**Gambar 2.4** Turbin *V-Blade Darrieus* (Erwandi, et al., 2014)

Turbin jenis *Darrieus* merupakan jenis turbin yang mudah untuk dibuat, baik secara mekanik maupun secara struktur. *Blade* turbin ini tetap bekerja, baik untuk kondisi *stall* ataupun ketika tidak terjadi *stall*.

Berbagai penelitian dilakukan untuk mengembangkan turbin tipe ini. Sebagian besar penelitian mengembangkan turbin *Darrieus* sebagai *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Sebuah *wind turbine* dengan skala medium mampu memproduksi energi sebesar 250 kW. Kelebihan dari penggunaan turbin tipe *Darrieus* adalah kemampuannya untuk meningkatkan performa aerodinamik. Penggunaan kombinasi *airfoil* yang tepat dan desain turbin yang tepat mampu menurunkan biaya produksi energi

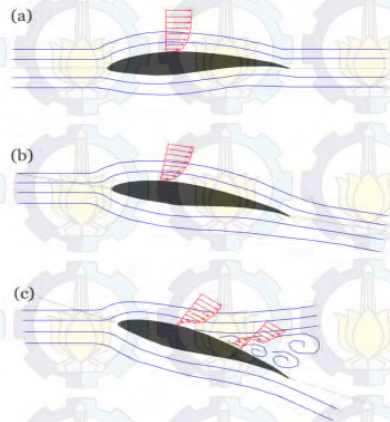


sampai 15%. (Paraschivoiu, 2002). Hal ini menunjukkan bahwa VAT jenis *Darrieus* potensial untuk dikembangkan lebih lanjut, terutama untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya produksi energi.

### 2.3 Aerodinamika Blade

Dalam sebuah turbin hidrokinetik, *blade* merupakan salah satu komponen penting. *Blade* harus didesain dengan baik sehingga mampu mengekstrak energi dari air seoptimal mungkin. Sebagian besar *blade* didesain dengan menggunakan *blade element metode*, dimana *blade* dibagi menjadi elemen-elemen kecil dengan jumlah yang tidak terbatas, sehingga didapatkan element *blade* 2D. Dengan menggunakan element *blade* ini, besarnya *angle of attack* dan gaya aerodinamiknya dapat dioptimalkan.

Selama beroperasi, besarnya *angle of attack* kemungkinan mengenai perubahan sehingga tidak sesuai dengan *desain*. Hal ini akan mengakibatkan *stall*. Fenomena *stall* ini dapat menyebabkan rugi aerodinamik yang besar. Gambar 2.5 menunjukkan fenomena *stall* yang terjadi pada sebuah *blade*.



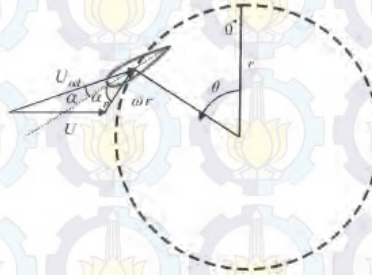
**Gambar 2.5** *Stream line* yang terjadi di sekeliling *blade* pada *angle of attack* yang berbeda (Bartl, 2011)



Gambar 2.5.a menunjukkan aliran fluida yang melalui *blade* dengan *angle of attack* sesuai desain. Terlihat bahwa aliran fluida dapat melewati profil *blade* dengan baik. Ketika *angle of attack* diperbesar hingga mencapai sudut kritisnya, aliran fluida masih dapat melewati fluida dengan baik seperti terlihat pada gambar 2.5.b. Namun ketika *angle of attack* diperbesar melebihi sudut kritisnya maka akan mulai muncul turbulensi dan aliran tidak mengikuti profil *blade* dengan baik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5.c. Fenomena ini disebut sebagai fenomena *stall*. Setelah melewati turbin, akan terjadi aliran turbulen di bagian belakang turbin, fenomena inilah yang disebut sebagai *wake*. Terjadinya *wake* dipengaruhi oleh berbagai efek aerodinamik (Bartl, 2011).

Sudut yang terbentuk antara kecepatan relative,  $U_{rel}$  dan garis cord *blade* disebut sebagai sudut serang atau *angle of attack*, seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. *Blade* pada VAHT mengalami perubahan *angle of attack* secara periodik. Apabila diasumsikan tidak terdapat *loss momentum* akibat *actuator disk*, *local angle of attack* pada *airfoil* VAHT dapat didefinisikan sebagai berikut :

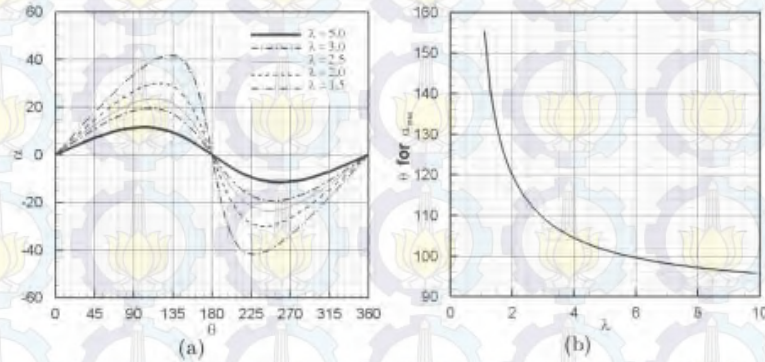
$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{\sin(\theta)}{\lambda + \cos(\theta)} \right] - \alpha_p \quad 2.2$$



**Gambar 2.6.** Skematik *angle of attack* untuk vertikal turbin (Birjandi, 2012)

Dimana  $\lambda = \frac{\omega.r}{U}$ , atau yang disebut sebagai *tip speed ratio*,  $\theta$  adalah sudut azimuth dan  $\alpha_p$  merupakan *angle of attack* yang

telah didesain. *Blade* pada bagian *upstream* akan mengekstrak momentum dari air sehingga kecepatan aliran berkurang, hal ini menyebabkan *tip speed ratio* (TSR) pada bagian *downstream* lebih besar dari pada *upstream*. Persamaan di atas berlaku untuk bagian *upstream*. Gambar 2.7 menunjukkan perubahan *angle of attack* pada VAT selama turbin berotasi :



**Gambar 2.7.** Untuk turbin sumbu vertikal (a) *angle of attack* sebagai fungsi TSR dan sudut azimuth, (b) azimuth dimana *angle of attack* maksimal terjadi TSR tertentu (Birjandi, 2012)

Besarnya *angle of attack* pada suatu *blade* sangat berpengaruh terhadap gaya aerodinamik pada *blade* tersebut. Terdapat dua jenis gaya pada *blade* yaitu gaya *drag* ( $F_D$ ) yang bekerja searah dengan kecepatan relatif ( $U_{rel}$ ) dan gaya *lift* ( $F_L$ ) yang bekerja tegak lurus kecepatan relatif. Gambar 2.8 menunjukkan gaya yang bekerja pada suatu *blade*. Koefisien *lift* dan *drag* yang bekerja pada suatu *blade* didefinisikan sebagai :

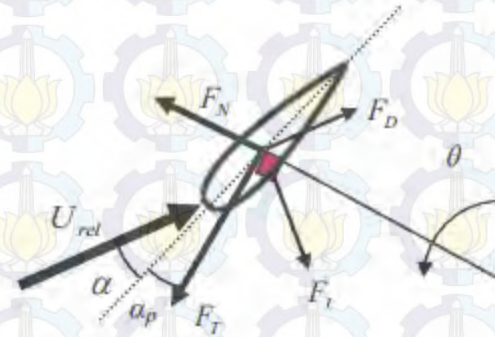
$$C_L = \frac{F_L}{0,5 \cdot \rho \cdot U^2 c} \quad 2.3$$

$$C_D = \frac{F_D}{0,5 \cdot \rho \cdot U^2 c} \quad 2.4$$

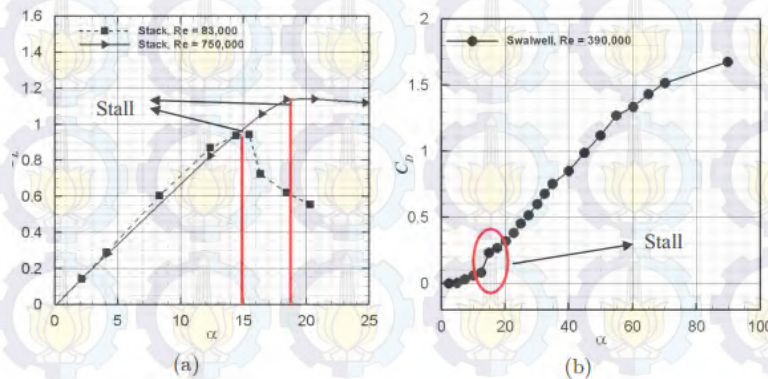
Besarnya koefisien *drag* dan koefisien *lift* dipengaruhi dari *angle of attack*, bentuk profil dan relative Reynold Number. Besarnya koefisien *lift* akan meningkat ketika *angle of attack*nya



juga meningkat, namun ketika sudah mencapai sudut kritis akan muncul separasi aliran yang menyebabkan penurunan koefisien *lift*. Fenomena ini disebut sebagai fenomena *stall*. Perubahan nilai  $C_l$  terhadap *angle of attack* dapat dilihat pada gambar 2.9. Gambar tersebut menunjukkan perubahan nilai  $C_l$  terhadap *angle of attack* untuk *airfoil* NACA 0012.



**Gambar 2.8.** Gaya yang bekerja pada *blade* (Birjandi, 2012)



**Gambar 2.9.** Efek *stall* pada (a) koefisien *lift* NACA 0012 dan (b) koefisien *drag* NACA 0012 (Birjandi, 2012)



Dari gambar 2.8,  $F_T$  merupakan gaya tangensial yang bekerja tegak lurus dengan lintasan rotasi. Gaya  $F_T$  ini menyebabkan torsi yang akan memutar turbin sehingga dapat menghasilkan energi mekanik. Sementara itu, gaya  $F_N$  merupakan gaya normal yang dapat menyebabkan fibrasi pada turbin. Secara matematis, besarnya koefisien gaya tangensial dan gaya normal dituliskan sebagai berikut :

$$C_T = \frac{F_T}{0,5 \cdot \rho \cdot U^2 c} = C_L \sin(\alpha + \alpha_p) - C_D \cos(\alpha + \alpha_p) \quad 2.5$$

$$C_N = \frac{F_N}{0,5 \cdot \rho \cdot U^2 c} = -C_D \sin(\alpha + \alpha_p) - C_L \cos(\alpha + \alpha_p) \quad 2.6$$

Besarnya torsi yang dapat dihasilkan oleh turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7. Sedangkan daya dan koefisien daya yang dihasilkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8 dan 2.9. Dimana  $r$  adalah jari-jari turbin,  $\omega$  adalah kecepatan rotasi turbin dan  $A_T$  adalah luas area sapuan turbin. (Birjandi, 2012)

$$T = r \times \sum F_T \quad 2.7$$

$$P = T \times \omega \quad 2.8$$

$$C_P = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot U^3 A_T} \quad 2.9$$

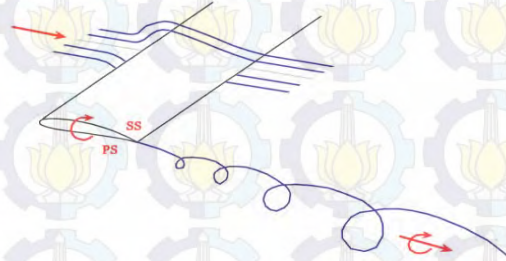
## 2.4 Aerodinamika Wake

Salah satu ciri utama dari *wake* turbin adalah penurunan kecepatan yang cukup besar dan peningkatan level turbulensi. Penurunan kecepatan yang besar menyebabkan penurunan energi yang dapat di ekstrak oleh *downstream* turbin. Sementara itu, peningkatan level turbulensi menyebabkan kelelahan (*fatigue*) pada turbin bagian *downstream*.

Karakteristik *wake* bergantung pada berbagai parameter. Salah satu fenomena penting dalam aerodinamika adalah aliran rotasional yang terjadi pada *wake*. Berbagai fenomena dapat digunakan untuk menganalisa struktur turbulensi dari *wake*. Salah satu fenomena tersebut adalah pembentukan *tip vortex*. *Tip vortex* menyebabkan munculnya separasi aliran yang memisahkan antara aliran *wake* berturbulensi tinggi dan aliran di sekelilingnya. Turbin memiliki profil *blade* yang hampir sama dengan sayap



pesawat. Perbedaan tekanan antara bagian atas (SS) dan bawah sayap (PS) mengakibatkan gaya *lift*. Karena perbedaan tekanan ini, terdapat fluida yang mengalir dari bagian bawah ke bagian atas sayap melalui tip. Aliran tersebut akan bercampur dengan aliran utama di sekeliling *blade* sehingga akan menyebabkan *vortex* di sekitar *tip* (*Tip Vortex*) seperti ditunjukkan pada gambar 2.10. Ciri-ciri dari *tip vortex* adalah kecepatan yang tinggi dan tekanan yang rendah. *Tip vortex* dapat mengakibatkan rugi aerodinamik yang cukup besar.



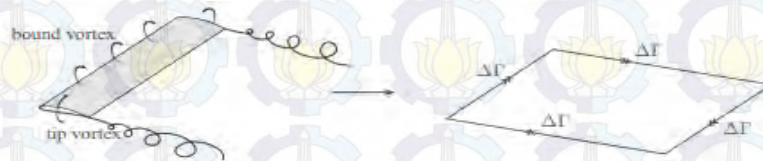
**Gambar 2.10.** Pembentukan *Tip Vortex* (Bartl, 2011)

Seperti pada bagian *tip*, aliran sekunder akibat perbedaan tekanan juga terjadi pada bagian *root*. Ketika aliran sekunder ini bercampur dengan aliran utama, maka akan terbentuk *root vortex*. Karena kecepatan pada bagian *root* lebih kecil jika dibandingkan dengan bagian *tip*, maka *loss* aerodinamik akibat *root vortex* lebih kecil dari *tip vortex* (Bartl, 2011).

Selain *tip vortex* dan *root vortex*, terdapat *bound vortex* yang terjadi pada *blade*. *Bound vortex* dapat dihubungkan dengan terbentuknya gaya *lift* dengan menggunakan persamaan Kutta-Joukowski,

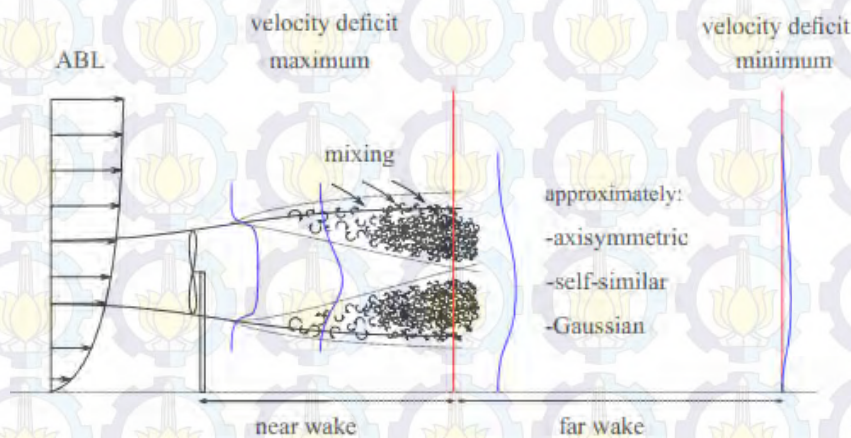
$$L = \rho V \Delta \Gamma \quad 2.10$$

Dimana  $\Delta \Gamma$  adalah *total strength*. *Bound vortex* terjadi akibat perubahan kecepatan yang mendadak pada *blade* dan karena perbedaan tekanan (Sanderse, 2009). Gambar 2.11 menunjukkan terjadinya *bound vortex* yang terjadi pada turbin.



**Gambar 2.11.** Vortex sistem pada *finite wing* (Sanderse, 2009)

*Wake* dari turbin terbentuk dari sistem *vortex* yang kompleks. Sistem *vortex* ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti, struktur aliran fluida yang mengenai turbin, perputaran aliran yang diakibatkan oleh gerakan turbin, *root vortex* dan tip *vortex*. Turbulensi akibat *vortex* akan terpecah dan bergabung dengan turbulensi yang lain sehingga akan membentuk turbulensi yang lebih besar. Gambar 2.12 menunjukkan proses pencampuran turbulensi pada pembentukan *wake* di belakang turbin.



**Gambar 2.12.** Proses pencampuran turbulensi pada *wake* di belakang turbin (Sanderse, 2009)



Terjadi pencampuran antara *wake* dan aliran disekelilingnya yang memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Sebagian momentum dari aliran yang berkecepatan tinggi diberikan kepada *wake* sehingga terjadi ekspansi *wake* dan peningkatan kecepatan aliran *wake*. Pada titik tertentu, aliran di sekeliling turbin dapat mencapai titik tengah *wake*. Hal ini menandai berakhirnya daerah *near wake*. Setelah daerah transisi ini, semua aliran *wake* akan berkembang. Daerah ini disebut sebagai daerah *far wake*. *Tip vortex* dan *root vortex* berperan dominan dalam terbentuknya daerah *near wake*. Untuk simulasi *wind far*, dan turbin *cascade*, daerah *far wake* menjadi fokus utama. (Bartl, 2011)

## 2.5 Array Turbin

Untuk mendapatkan kapasitas pembangkitan sesuai dengan keinginan, biasanya *array* atau susunan turbin perlu dipasang. Kondisi lingkungan pemasangan *power plant* dan keinginan untuk membangun pembangkit dengan biaya efektif yang murah juga merupakan salah satu alasan pembangunan *array* turbin. Sebuah *array* turbin dibangun dengan jarak antar turbin yang dekat, sehingga interaksi hidrodinamika sangat berpengaruh terhadap performansi turbin. Besarnya efisiensi suatu *array* turbin (*farm*) merupakan perbandingan antara daya *output* dari N turbin dan *stand-alone turbine* (turbin tunggal). Persamaan 2.11 sampai 2.13 merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung besarnya efisiensi *array* turbin. Dimana  $P_{farm}$  merupakan daya yang dihasilkan oleh *array* turbin.  $P_{ref.farm}$  merupakan daya referensi, yaitu hasil perkalian antara jumlah turbin dalam *array* dengan daya *stand alone* turbin. N merupakan jumlah turbin dalam suatu *array*.  $P_s$  merupakan daya yang dihasilkan oleh *stand-alone turbine*.  $P_i$  merupakan daya yang dihasilkan oleh masing-masing turbin dalam *array*.

$$\eta = \frac{P_{farm}}{P_{ref.farm}} \quad 2.11$$

$$P_{ref.farm} = N.P_s \quad 2.12$$



$$P_{ref} = \sum_i^N P_i \quad 2.13$$

$P_{ref, farm}$  menggambarkan daya yang dihasilkan oleh N turbin dalam suatu *array* ketika tidak ada efek interaksi hidrodinamika yang terjadi. Efek interaksi hidrodinamika merupakan hal utama yang harus diperhatikan ketika mendesain suatu *array* turbin (Li, 2014). *Output* yang dihasilkan oleh *array* turbin dipengaruhi oleh ukuran *array*, bagaimana turbin-turbin tersebut disusun dan kanal tempat turbin dipasang (Vennell, et al., 2015).

## 2.6 SST

Kebutuhan komputasi yang akurat dalam dunia aeronautik merupakan salah satu penyebab berkembangnya model turbulensi SST. Terjadinya *adverse pressure gradient* dan separasi dalam simulasi aeronautik menyebabkan model turbulensi yang sebelumnya dikembangkan tidak mampu menghasilkan prediksi yang akurat. Model SST merupakan salah satu pengembangan dari model turbulensi k- $\omega$ . Model k- $\omega$  memiliki keakuratan lebih baik dari pada model k- $\epsilon$ , terutama untuk simulasi *near-wall* dan aliran dengan *adverse pressure gradient*. Namun model k- $\omega$  gagal dalam menyelesaikan kasus aliran dengan *pressure induced separation*. Seiring dengan kebutuhan keakuratan simulasi, saat ini model SST tidak hanya digunakan dalam bidang aeronautik, namun mulai digunakan di bidang industri, komersial dan beberapa penelitian (Menter, et al., 2003).

Model turbulensi SST merupakan penggabungan dari model k- $\omega$  dan k- $\epsilon$ . Penggabungan ini dimaksudkan untuk mengoptimalkan kelebihan dari masing-masing model turbulensi dan menghilangkan kelemahan yang dimiliki. SST diturunkan dari persamaan *eddy viscosity* (Menter, et al., 2003). Berikut ini adalah formulasi model turbulensi SST :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad 2.14$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = & \alpha \rho \omega^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] \\ & + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{w2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad 2.15$$

Dimana fungsi penggabungan  $F_1$  didefinisikan sebagai :

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{w2} k}{CD_{kw} y^2} \right] \right\}^4 \quad 2.16$$

$$\text{Dengan } CD_{kw} = \max \left( 2\rho \sigma_{w2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad 2.17$$

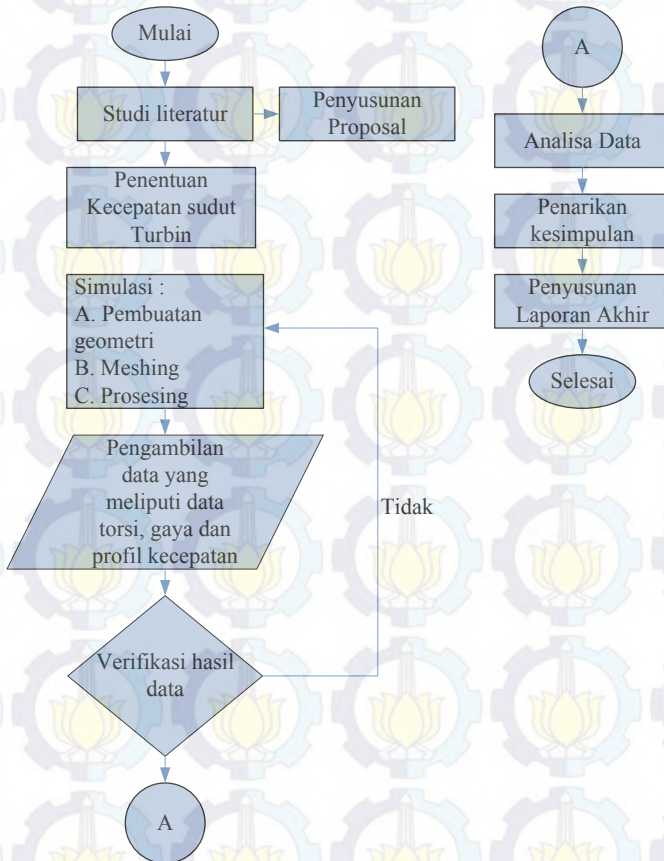
$y$  merupakan jarak dari *wall* terdekat.



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 merupakan diagram alir yang digunakan dalam pelaksanaan tugas akhir ini. Pada gambar tersebut dapat diketahui tahapan-tahapan pelaksanaan tugas akhir.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

Pelaksanaan tugas akhir ini diawali dengan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk meningkatkan pemahaman peneliti terhadap topik penelitian yang diambil. Literatur yang digunakan oleh peneliti terdiri dari jurnal, laporan, buku, *website* dan berbagai sumber lain yang mendukung. Hal-hal yang dipelajari dari studi literatur adalah sebagai berikut : energi hidrokinetik, turbin tipe *Darrieus*, aerodinamika *blade*, aerodinamika *wake*, *array* turbin, CFD, SST dan lain-lain.

Untuk mengetahui kecepatan rotasi turbin yang akan disimulasikan, maka dilakukan prediksi kecepatan melalui proses ekstrapolasi. Selanjutnya dilakukan proses validasi untuk menentukan ukuran mesh dan *boundary condition* yang akan digunakan dalam simulasi. Ekstrapolasi dan validasi dilakukan dengan menggunakan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya.

Selanjutnya adalah simulasi yang meliputi pembuatan geometri, *meshing*, *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD). Data-data yang diperoleh dari simulasi meliputi torsi, gaya dan kontur kecepatan aliran di belakang turbin (profil *wake*). Dalam melakukan pengambilan data ini, peneliti menggunakan empat macam variasi kecepatan (0.5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s; dan 2 m/s) untuk turbin tunggal, *array* I dan *array* II. Data hasil simulasi ini kemudian dianalisa.

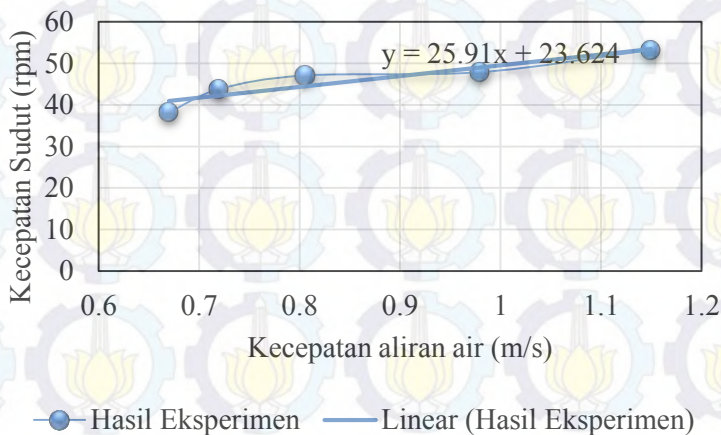
### **3.2 Prediksi Kecepatan Turbin**

Pada tugas akhir ini dilakukan prediksi kecepatan rotasi turbin dengan menggunakan metode ekstrapolasi dan analisa dimensional. Proses esktrapolasi dan analisa dimensional didasarkan pada data penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mecha Garindra G (Gunawan, 2014).

**Tabel 3.1** Tabel hubungan kecepatan putaran turbin dan kecepatan arus air pada penelitian sebelumnya (Gunawan, 2014)

No	Kecepatan air (m/s)	Kecepatan putaran turbin (rpm)
1	0.67	38.18
2	0.72	43.79
3	0.806	47.09
4	0.98	47.89
5	1.15	53.26

Prediksi kecepatan dengan metode ekstrapolasi dilakukan dengan mencari persamaan garis hubungan kecepatan aliran arus laut dan kecepatan putar turbin. Tabel 3.1 menunjukkan kecepatan putar turbin untuk empat variasi kecepatan arus. Data tersebut direpresentasikan dalam bentuk grafik pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Grafik hubungan kecepatan sudut turbin dan kecepatan aliran air



Persamaan yang menghubungkan kecepatan putaran turbin dan kecepatan aliran air adalah sebagai berikut :

$$y = 25.91x + 23.624 \quad 3.1$$

Dari grafik persamaan 3.1 dapat diketahui besarnya kecepatan sudut turbin untuk kecepatan air 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s; dan 2 m/s. Tabel 3.2 menunjukkan hasil perhitungan kecepatan rotasi turbin untuk masing-masing variasi kecepatan tersebut.

**Tabel 3.2** Tabel hubungan kecepatan rotasi turbin dan kecepatan aliran arus hasil ekstrapolasi

No	Kecepatan air (m/s)	Kecepatan putaran turbin (rpm)
1	0.5	36.58
2	1	49.53
3	1.5	62.49
4	2	75.44

Dalam tugas akhir ini, digunakan turbin yang memiliki ukuran lebih besar dari turbin pada penelitian sebelumnya. Sehingga perlu dilakukan analisa dimensional untuk memprediksi kecepatan rotasi turbin. Persamaan analisa dimensional yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\omega_v = \frac{\omega_s R_s}{R_v} \quad 3.2$$

Dimana :  $\omega_v$  adalah kecepatan sudut turbin 2

$\omega_s$  adalah kecepatan sudut turbin 1

$R_s$  adalah jari-jari turbin 1

$R_v$  adalah jari-jari turbin 2

Besarnya  $R_s$  adalah 0,2 m, dan besarnya  $R_v$  adalah 3,84 m. Tabel 3.3 menunjukkan hasil prediksi kecepatan sudut turbin. Hasil tersebut akan digunakan dalam simulasi CFD sehingga dapat dilakukan analisa torsi, gaya, dan profil kecepatannya.

**Tabel 3.3** Tabel hubungan kecepatan rotasi turbin dan kecepatan aliran arus hasil analisa dimensional

No	Kecepatan air (m/s)	Kecepatan putaran turbin (rpm)
1	0.5	3.81
2	1	5.16
3	1.5	6.51
4	2	7.86

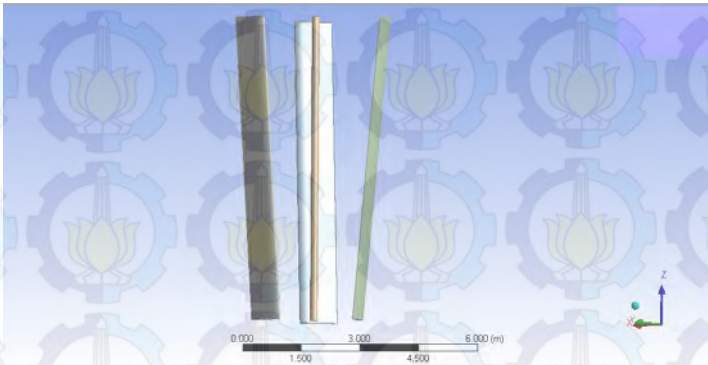
### 3.3 Pembuatan Geometri Turbin *V-Blade*

Pembuatan geometri turbin diawali dengan mengimport *airfoil* NACA 0018 ke dalam *software* CFD. *Airfoil* yang diimport tersebut masih berupa titik sehingga perlu dilakukan pembuatan garis, bidang dan kemudian volume. Terdapat 6 domain yang digunakan dalam simulasi ini, yaitu *foil 1*, *foil 2*, *foil 3*, *shaft* yang merupakan komponen utama turbin, selanjutnya adalah domain tabung dan domain laut yang menggambarkan lokasi tempat turbin tersebut dipasang. Turbin yang disimulasikan memiliki ukuran seperti ditunjukkan pada tabel 3.4

**Tabel 3.4.** Ukuran Turbin

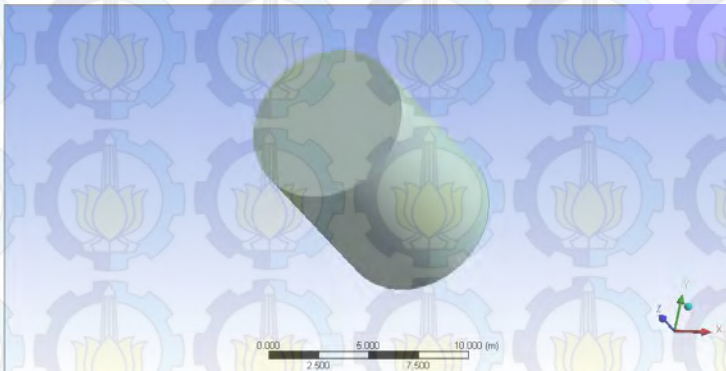
No	Besaran	Nilai
1	Aspek rasio	7.71
2	Panjang <i>Cord</i>	1 m
3	Panjang <i>Span</i>	7.71 m
4	Diameter Atas	3.84 m
5	Diameter Bawah	2.497 m



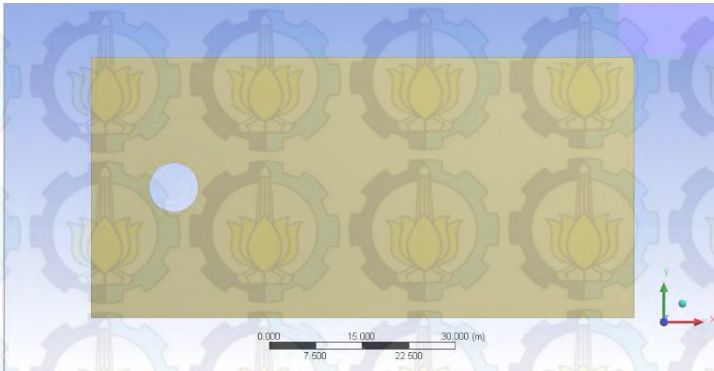


**Gambar 3.3.** Turbin *V-Blade Darrieus*

Gambar 3.3 menunjukkan gambar turbin *V-Blade Darrieus*. Turbin ini memiliki bentuk V, dengan kemiringan  $5^\circ$ . Sudut ini merupakan sudut yang dibentuk antara sumbu z dan *blade*. Setelah pembuatan turbin selesai, dilanjutkan dengan pembuatan domain tabung dan domain laut.

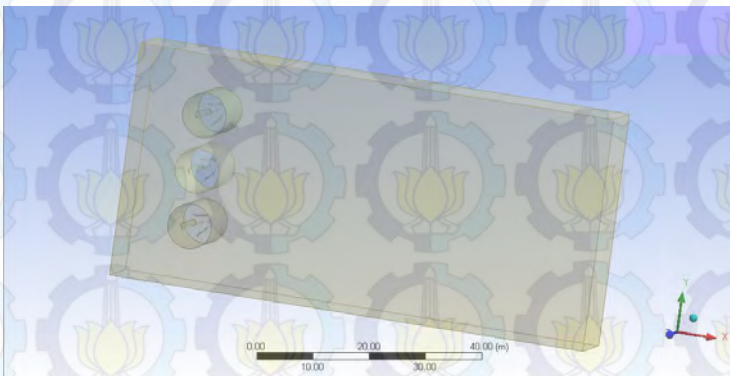


**Gambar 3.4.** Domain Tabung



**Gambar 3.5.** Domain laut

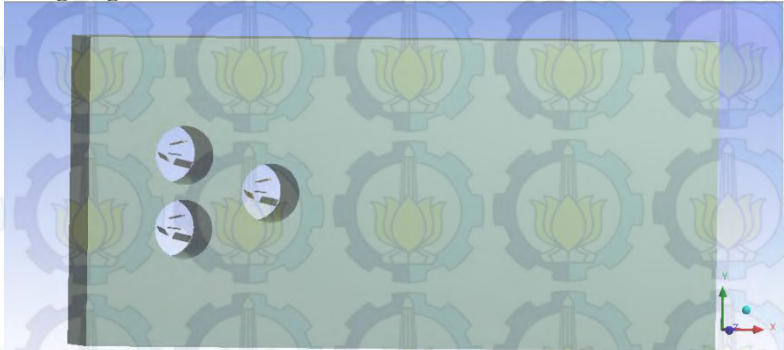
Domain laut berbentuk balok dengan lubang berbentuk tabung. Lubang tersebut memiliki ukuran yang sama dengan domain tabung. Gambar 3.4 dan 3.5 masing - masing menggambarkan domain tabung dan domain laut. Jari-jari domain tabung adalah  $3/2 D$  dan tinggi tabung  $3/2$  tinggi turbin. Sementara itu, ukuran domain laut adalah  $3D$  pada bagian *upstream*,  $20D$  pada bagian *downstream* dan lebar  $11D$ , dimana  $D$  merupakan diameter turbin. Cara pembuatan domain laut adalah dengan mensubstrak balok dengan tabung. Turbin *V-Blade* diletakkan di tengah-tengah domain tabung.



**Gambar 3.6.** Array I (susunan sejajar)



Pembuatan geometri *array* I dan *array* II hampir sama dengan pembuatan geometri untuk turbin tunggal. Gambar 3.6 dan 3.7 menunjukkan gambar *array* I dan *array* II. Pada *array* I turbin disusun secara sejajar. Sedangkan pada *array* II, turbin disusun secara *zig-zag*.

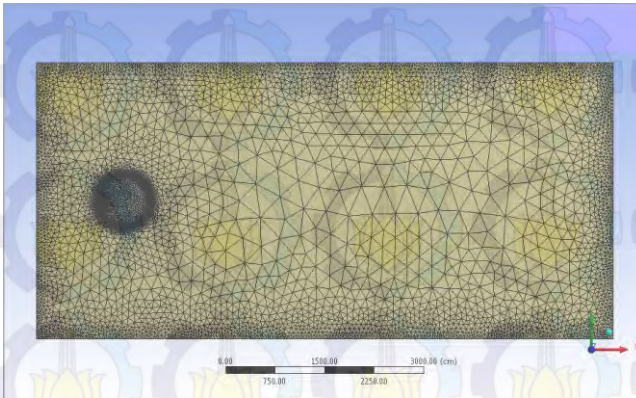


**Gambar 3.7.** *Array* II (susunan *zig-zag*)

### 3.4 Meshing

*Meshing* merupakan proses membagi geometri yang telah dibuat menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai *control volume*. Persamaan konservasi energi, massa, momentum dan persamaan lain diterapkan di masing-masing *control volume*. Ukuran *mesh* sangat menentukan seberapa valid hasil simulasi. Semakin kecil *mesh* yang digunakan, maka semakin baik pula akurasi. Namun semakin berat juga komputasi yang harus dilakukan.

Selain ukuran *mesh*, jenis *mesh* yang digunakan juga sangat mempengaruhi kualitas *mesh*. Dalam tugas akhir ini digunakan *mesh* jenis tetrahedral yang cocok untuk geometri yang kompleks.



**Gambar 3.8.** Contoh hasil meshing

Untuk mendapatkan hasil simulasi yang valid namun tidak membutuhkan komputasi yang besar, maka digunakan ukuran *mesh* berbeda untuk masing-masing bagian. Bagian turbin (*foil* dan *shaft*) memiliki ukuran *mesh* yang jauh lebih kecil dari ukuran *mesh* domain. Hal ini dilakukan karena akan dilakukan pengambilan data torsi dan gaya pada bagian ini, sehingga dibutuhkan kualitas *mesh* yang baik. Selain itu, simulasi yang dilakukan menggunakan model turbulensi SST yang memerlukan kualitas *mesh* yang baik. Ukuran *mesh* turbin adalah 0,0005 m sampai 0,1 m. Sementara itu, ukuran *mesh* untuk bagian lain adalah 0,1 m sampai 0,3 m. Gambar 3.8 menunjukkan *meshing* pada geometri yang sudah dibuat. Dari gambar tersebut terlihat bahwa, daerah yang dekat dengan turbin memiliki ukuran *mesh* yang lebih kecil.

### 3.5 Pre-Processing dan Processing

Pada tahap ini dilakukan pengkondisian kondisi batas atau *boundary condition*. Pemilihan kondisi batas harus tepat untuk mendapatkan hasil yang valid. Kondisi batas harus sesuai dengan kondisi benda dan lingkungan yang disimulasikan.



**Tabel 3.5.** Kondisi Batas

No	Kondisi Batas	Posisi	Kondisi
<b>Domain Laut (<i>Fluid Domain</i>)</b>			
1	Inlet	Depan domain laut	Kecepatan sesuai dengan kondisi pada tabel 3.3, <i>Turbulence model : low intensity</i>
2	Opening	Kanan,kiri, belakang	<i>Mass and momentum : Entrainment, Zero Gradient</i>
3	<i>Freewall</i> laut	Atas dan bawah	<i>Free Slip Wall</i>
4	<i>Interface</i>	Permukaan dalam lubang (tabung)	<i>Mesh Connection : GGI</i>
<b>Domain Tabung (<i>Fluid Domain</i>)</b>			
1	Freewall tabung	Atas dan bawah	<i>Free Slip Wall</i>
2	<i>Interface</i>	Permukaan luar tabung	<i>Mesh Connection : GGI</i>
<b>Turbin (<i>Immersed Solid</i>)</b>			
1	Turbin	<i>V-blade Darrieus</i>	<i>Wall</i>

Terdapat 3 jenis domain yang didefinisikan pada tahap *pre-processing*. Masing-masing domain memiliki kondisi batas yang berbeda-beda. Kondisi batas untuk masing-masing domain ditunjukkan pada tabel 3.5. Dalam simulasi ini digunakan model turbulensi SST karena model ini cocok digunakan untuk simulasi aerodinamika dan memiliki akurasi yang baik di bagian *nearwall*.

Setelah menyelesaikan tahap *pre-processing*, selanjutnya adalah tahap *processing*. Pada tahap ini, dilakukan iterasi sampai hasil yang diperoleh konvergen. Hasil yang konvergen ditandai dengan nilai RMS dibawah  $10^{-4}$ .

Setelah proses iterasi selesai, maka akan diperoleh hasil simulasi. Dilakukan pengambilan data torsi, gaya dan profil kecepatan dari hasil simulasi. Kemudian data-data tersebut diolah dan dianalisa.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Validasi Hasil Simulasi**

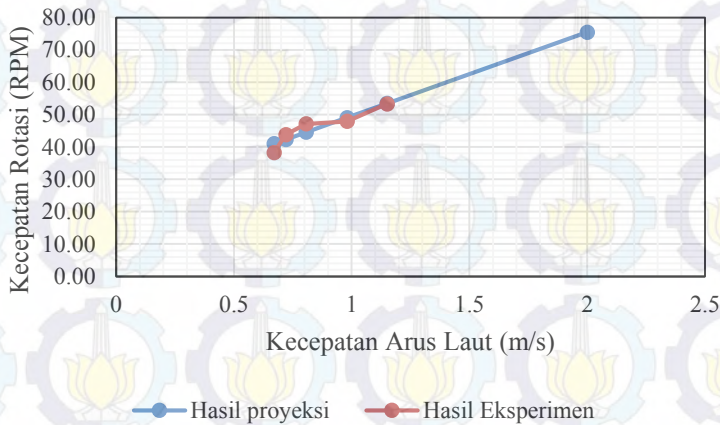
Validasi data merupakan salah satu proses penting dalam suatu penelitian terutama untuk simulasi. Melalui proses validasi, dapat diketahui kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Dalam tugas akhir ini dilakukan dua tahap validasi. Validasi pertama adalah untuk menentukan kesesuaian metode ekstrapolasi yang digunakan untuk memprediksi kecepatan rotasi turbin. Sedangkan validasi kedua bertujuan untuk menentukan kesesuaian *boundary condition* serta *mesh* yang digunakan dalam simulasi.

##### **4.1.1 Validasi Kecepatan Rotasi Turbin**

Untuk mendapatkan kecepatan rotasi turbin *V-Blade Darrieus*, digunakan hasil eksperimental yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Data-data yang digunakan untuk memprediksi kecepatan rotasi turbin, salah satunya didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Mecha Garinda A G (Gunawan, 2014) .

Pada penelitian tersebut, variasi kecepatan maksimal yang diberikan pada turbin adalah 1,15 m/s. Oleh karena itu perlu dilakukan ekstrapolasi untuk mengetahui kecepatan rotasi turbin ketika diberikan kecepatan aliran arus 2 m/s. Dengan menggunakan metode ekstrapolasi, dapat diketahui hubungan antara kecepatan aliran arus laut dan kecepatan rotasi turbin (rpm). Melalui persamaan tersebut dapat diprediksi kecepatan rotasi turbin untuk variasi kecepatan arus 0,5 m/s; 1 m/s 1,5 m/s dan 2 m/s.





**Gambar 4.1.** Grafik Hubungan Kecepatan air dan Kecepatan Rotasi Turbin

Gambar 4.1 menunjukkan grafik hubungan kecepatan putar turbin dan kecepatan aliran air. Dari gambar tersebut terlihat bahwa hasil ekstrapolasi dan hasil eksperimental menunjukkan pola yang hampir sama. Semakin besar aliran air yang mengenai turbin maka semakin besar kecepatan rotasi turbin. Selain itu, grafik hasil eksperimental dan hasil ekstrapolasi saling berhimpit. Hal ini menunjukkan bahwa hasil eksperimental dan hasil ekstrapolasi memiliki *error* yang kecil.

Grafik hasil ekstrapolasi memiliki persamaan garis, sebagai berikut :

$$y = 25,91x + 23,624 \quad 4.1$$

Dimana  $y$  merupakan kecepatan rotasi turbin (RMS) dan  $x$  merupakan kecepatan air (m/s). Untuk mengetahui nilai *error* yang diperoleh dari proses ekstrapolasi, maka dilakukan perhitungan proyeksi kecepatan turbin dengan menggunakan persamaan 4.1.

**Tabel 4.1.** Tabel perbandingan hasil eksperimen dan hasil ekstrapolasi

No	Kecepatan air	Eksperimen (RPM)	Ekstrapolasi (RPM)	<i>error</i>
1	0.67	38.18	40.98	7.34 %
2	0.72	43.79	42.28	3.44 %
3	0.806	47.09	44.51	5.48 %
4	0.98	47.89	49.02	2.35 %
5	1.15	53.26	53.42	0.30 %
6	2		75.45	
Rata-rata Error				3.78 %

Hasil perhitungan ini dapat dilihat pada tabel 4.1. Melalui metode ekstrapolasi ini diprediksi bahwa ketika kecepatan arus laut 2 m/s, maka kecepatan rotasi turbin adalah 75,45 Rpm. Dari tabel 4.1 terlihat bahwa masing-masing kecepatan memiliki nilai *error* yang berbeda. Besarnya nilai *error* rata-rata antara hasil eksperimental dan ekstrapolasi adalah 3,78 %. Hal ini menunjukkan bahwa nilai kecepatan sudut hasil ekstrapolasi valid untuk digunakan dalam proses simulasi.

#### 4.1.2 Validasi *Boundary Condition* dan *Meshing*

Penentuan *Boundary Condition* merupakan salah satu tahapan penting ketika melakukan simulasi CFD. Kesesuaian hasil simulasi dan kondisi *real* dipengaruhi oleh *boundary condition* yang digunakan. Validasi *boundary condition* bertujuan untuk menentukan *boundary condition* yang sesuai dengan kondisi nyata.

Validasi *boundary condition* dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi pada tugas akhir ini dengan hasil simulasi pada penelitian sebelumnya yang dilakukan



oleh Susilo (Susilo, 2014). Validasi pada penelitian tersebut dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimental yang dilakukan oleh Mecha Garindra G (Gunawan, 2014). Kondisi yang akan disimulasikan dalam tugas akhir ini memiliki kesamaan dengan kondisi eksperimen yang dilakukan pada penelitian tersebut.

Aspek yang ditinjau dalam proses validasi *boundary condition* dan *mesh* adalah nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin. Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan torsi hasil simulasi pada tugas akhir ini dan torsi pada penelitian sebelumnya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan dua variasi kecepatan, yaitu kecepatan 0,6 m/s dan kecepatan 0,7 m/s.

**Tabel 4.2.** Tabel Perbandingan torsi hasil simulasi tugas akhir dengan penelitian sebelumnya

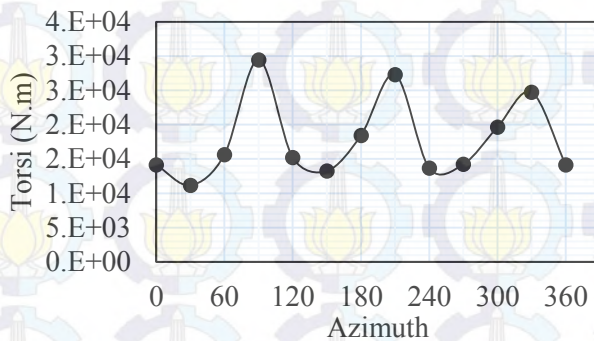
Kecepatan	Penelitian sebelumnya		Tugas Akhir ini		Error
	Jumlah mesh	Torsi (N.m)	Jumlah mesh	Torsi (N.m)	
0,6 m/s	7786724	12,69	6748458	12,46	2 %
0,7 m/s	7786724	16,05	6748458	16,9	5 %
Error rata-rata					3,5 %

Dari table 2.2, terlihat bahwa rata-rata nilai eror yang dihasilkan adalah 3,5%. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi yang telah dipilih sebagai *boundary condition* sesuai dengan kondisi nyata. Sehingga, *boundary condition* dan ukuran *mesh* tersebut dapat digunakan untuk melakukan simulasi turbin pada tugas akhir ini.

## 4.2 Turbin Tunggal (*Stand Alone Turbine*)

### 4.2.1 Torsi dan Gaya untuk Turbin Tunggal (*Stand Alone Turbine*)

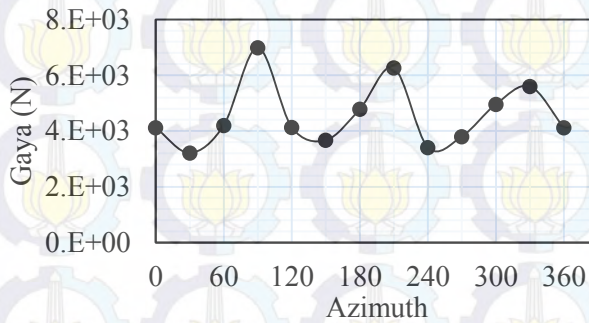
Torsi dan gaya merupakan salah satu parameter penting yang harus diketahui ketika melakukan simulasi mengenai turbin. Melalui dua besaran ini dapat diketahui besarnya energi yang dapat dihasilkan oleh turbin.



**Gambar 4.2.** Grafik Hubungan Torsi dan Sudut Azimuth untuk *Stand Alone Turbine* Kecepatan Air 0,5 m/s

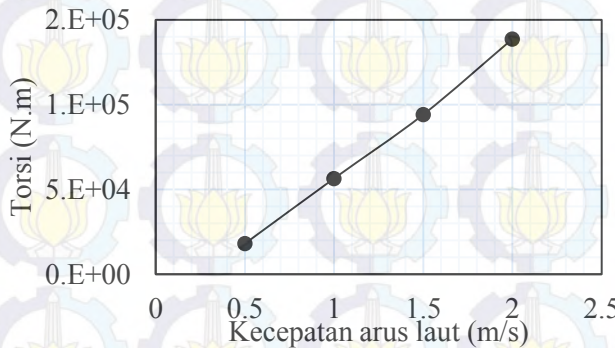
Hasil simulasi menunjukkan bahwa, selama turbin *V-Blade Darrieus* berputar, maka terjadi perubahan nilai torsi dan gaya seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 dan 4.3. Kedua gambar tersebut memperlihatkan gaya dan torsi yang dihasilkan oleh *stand alone turbine* untuk kecepatan 0,5 m/s. Pola sinusoidal terbentuk selama turbin berputar (360°). Pola ini terjadi akibat perubahan *angle of attack* untuk masing-masing *blade*. Dari gambar tersebut, terdapat 3 buah gelombang yang menunjukkan bahwa turbin *V-Blade Darrieus* yang disimulasikan memiliki tiga buah *blade*.





**Gambar 4.3.** Grafik Hubungan Gaya dan Sudut Azimuth untuk *Stand Alone Turbine* Kecepatan Air 0,5 m/s

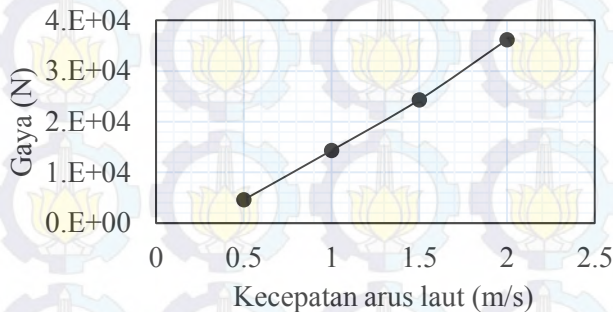
Torsi total dan gaya total merupakan rata-rata gaya dan torsi yang dihasilkan selama turbin berputar. Untuk mendapatkan nilai gaya dan torsi total, maka nilai gaya dan torsi untuk masing-masing azimuth harus dirata-ratakan.



**Gambar 4.4.** Grafik Hubungan Torsi dan Kecepatan Aliran Air

Pada simulasi ini, diberikan variasi kecepatan air 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s dan 2 m/s. Gambar 4.4 dan 4.5 menunjukkan pengaruh kecepatan aliran air terhadap torsi dan gaya yang dihasilkan oleh *stand alone turbine*. Dari gambar

tersebut dapat diketahui bahwa torsi terbesar yang dihasilkan oleh turbin adalah 138570 N.m. Torsi tersebut dihasilkan ketika turbin dikenai arus laut dengan kecepatan 2 m/s. Sementara itu, gaya terbesar juga dihasilkan pada kecepatan air tersebut, yaitu sebesar 36166.34 N.



**Gambar 4.5.** Grafik Hubungan Gaya dan Kecepatan Aliran Air

#### 4.2.2 Profil *Wake* untuk Turbin Tunggal (*Stand Alone Turbine*)

*Wake* atau olakan dibelakang turbin merupakan fenomena yang terjadi ketika turbin berputar. Fenomena ini terjadi akibat ekstraksi energi air yang dilakukan oleh turbin sehingga energi dan momentum yang dimiliki oleh air menurun. Penurunan energi ini mengakibatkan penurunan kecepatan air.

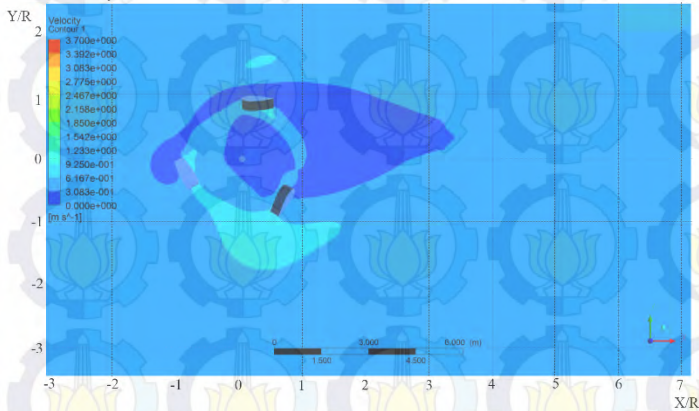
*Wake* tersusun dari interaksi *vortex* yang sangat kompleks. Selain itu juga terjadi *turbulence mixing* antara daerah di belakang turbin yang memiliki kecepatan rendah dan lingkungan yang memiliki kecepatan lebih tinggi. Hal ini mengakibatkan terjadinya pertukaran momentum dan energi dari lingkungan ke daerah *wake*, sehingga besarnya kecepatan daerah *wake* kembali ke nilai semula (sama dengan kecepatan arus lingkungan).

Dalam perancangan suatu *array* turbin, analisa mengenai panjang *wake* yang terbentuk di belakang turbin

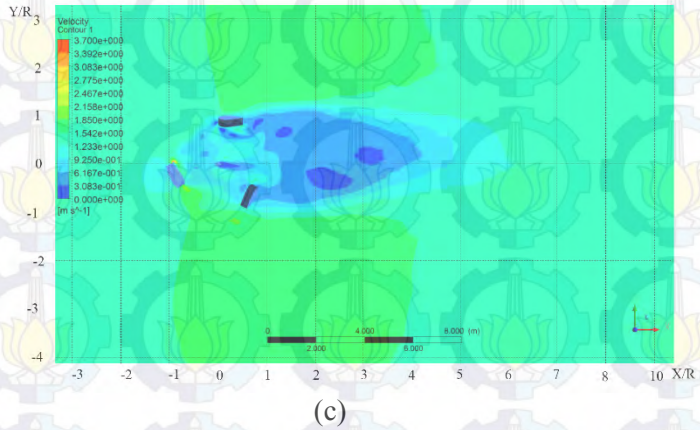
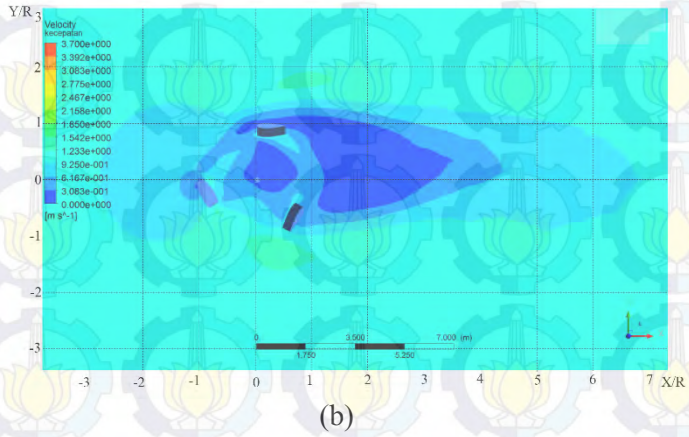


penting untuk dilakukan. Daerah *wake* yang berkecepatan rendah akan menurunkan performansi dari turbin *downstream*. Sehingga, tidak dianjurkan memasang turbin *downstream* di area *wake* turbin *upstream*. Untuk menentukan konfigurasi *array* turbin yang tepat, maka perlu dilakukan analisa *wake* untuk *stand alone turbine*.

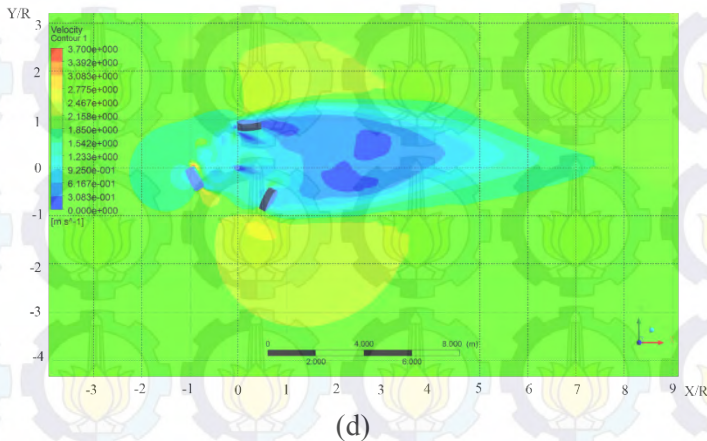
Gambar 4.6 menunjukkan profil kecepatan aliran untuk *stand alone turbine* yang dikenai kecepatan aliran air 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s dan 2 m/s. Dari hasil simulasi yang dilakukan, diketahui bahwa *wake* terpanjang dihasilkan oleh turbin yang diberikan kecepatan aliran air 2 m/s. Panjang total *wake* yang dihasilkan adalah mencapai 7,5R, dengan panjang daerah *near wake* 4,25R.



(a)







**Gambar 4.6.** Profil *Wake Stand Alone Turbine* untuk Kecepatan arus laut : (a) 0,5 m/s; (b) 1 m/s; (c) 1,5 m/s; (d) 2 m/s

Berdasarkan simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa, turbin *downstream* harus dipasang minimal pada jarak 7,5R dari turbin *upstream*. Apabila hal tersebut tidak dilakukan, maka dimungkinkan akan terjadi penurunan performansi turbin *downstream*.

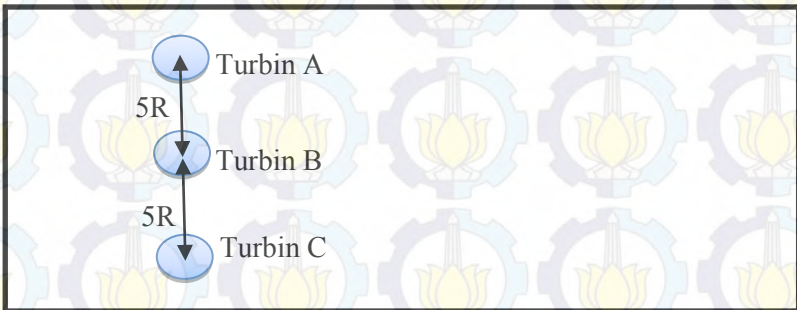
### 4.3 Desain Array I

Untuk memperoleh daya keluaran yang besar dan karena alasan ekonomis, suatu pembangkit listrik tenaga arus laut harus disusun dalam sebuah konfigurasi tertentu yang disebut sebagai *array*. Konfigurasi *array* sangat berpengaruh terhadap performansi masing-masing turbin dalam *array*. Konfigurasi *array* yang salah dapat menyebabkan penurunan efisiensi yang besar.

Terdapat beberapa konfigurasi *array* yang dapat digunakan untuk membangun sebuah pembangkit listrik tenaga arus laut. Salah satunya adalah pemasangan turbin secara sejajar dalam satu baris. Untuk desain *array* I, digunakan konfigurasi dimana turbin

disusun sejajar dalam satu baris. Jarak poros antara turbin adalah  $5R$ . Pengambilan ini didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Chul-Hee Jo, dkk (Jo, et al., 2014) dan pertimbangan agar mudah untuk melakukan pemeliharaan antar turbin.

Pemilihan konfigurasi ini didasarkan pada literatur yang ada. Konfigurasi turbin dalam satu baris memiliki performansi terbaik. Pemasangan turbin disamping turbin yang lain akan menyebabkan masing-masing turbin mendapatkan arus dengan kecepatan yang sama. Selain itu, *wake* dibelakang turbin tidak berpengaruh besar terhadap performansi turbin yang lain. Gambar 4.7 menunjukan skema konfigurasi *array* I.

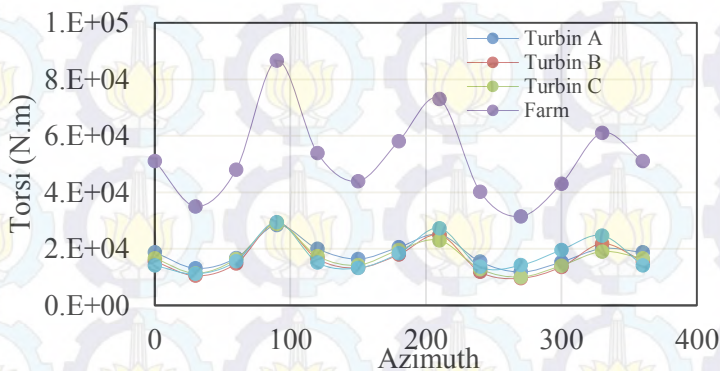


**Gambar 4.7.** Skema konfigurasi *array* I

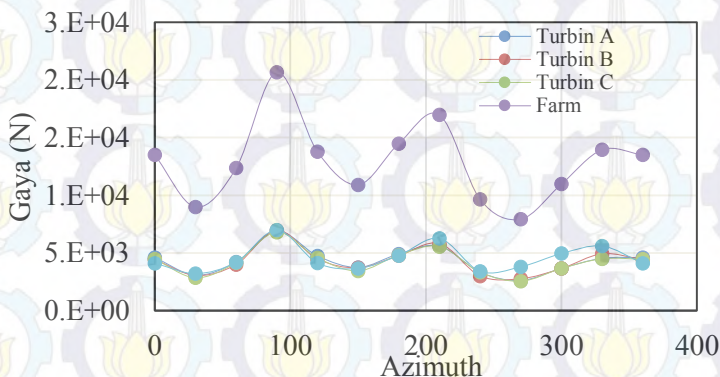
#### 4.3.1 Torsi dan Gaya untuk Desain Array I

Besarnya nilai torsi dan gaya yang dihasilkan oleh *array* turbin akan berubah membentuk pola sinusoidal, seperti ditunjukkan pada gambar 4.8 dan 4.9. Gambar tersebut merupakan hasil simulasi *array* I untuk kecepatan aliran air  $0,5 \text{ m/s}$ . Sementara itu, untuk variasi kecepatan yang lain menunjukkan pola yang sama. Dari gambar tersebut terlihat bahwa torsi dan gaya masing-masing turbin dan *farm* membentuk pola sinusoidal yang terdiri dari 3 gelombang. Telah disebutkan sebelumnya bahwa pola sinusoidal ini terjadi karena perubahan *angle of attack* selama turbin tersebut berputar. Sementara itu, 3 gelombang yang terbentuk menunjukkan jumlah *blade* turbin.





**Gambar 4.8.** Torsi yang dihasilkan oleh *Array I* untuk kecepatan 0,5 m



**Gambar 4.9.** Gaya yang dihasilkan oleh *Array I* untuk kecepatan 0,5 m/s

Torsi dan gaya yang dihasilkan oleh sebuah *array* turbin merupakan penjumlahan torsi dan gaya dari masing-masing turbin. Dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9 bahwa torsi dan gaya yang dihasilkan oleh sebuah *array* turbin lebih besar dari torsi dan gaya yang dihasilkan oleh masing-masing turbin. Tabel 4.3 menunjukkan torsi yang dihasilkan oleh *array I* untuk masing-masing variasi kecepatan.

**Tabel 4.3.** Torsi yang dihasilkan oleh *Array I*

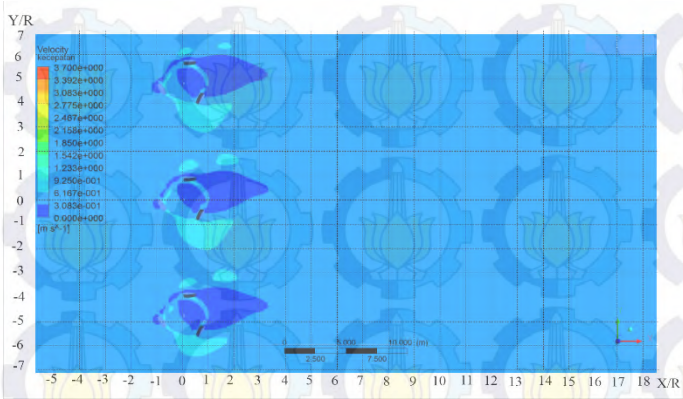
Kec (m/s)	Torsi			Torsi Total	Torsi Stand Alone	Efisiensi <i>Farm</i>
	Turbin A	Turbin B	Turbin C			
0.5	18528.7	16599.3	16681.6	51809.6	17763.3	0.97
1	57368.7	52336.5	53175.6	162880.8	56428.6	1
1.5	117353.7	107748.1	109343.5	334445.4	94058.1	1.2
2	198577.0	182913.6	185602.2	567092.7	143645.7	1.3

Nilai torsi total yang dihasilkan oleh sebuah *array* turbin mengalami peningkatan ketika kecepatan aliran air yang diberikan juga meningkat. Besarnya torsi terbesar yang mampu dihasilkan oleh *array I* adalah 567092,7 N dengan efisiensi *farm* 1,3. Nilai efisiensi *farm* yang lebih dari 1 menunjukkan bahwa pemasangan *array I* mampu meningkatkan performansi dari turbin. Perhitungan nilai efisiensi diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.11. Nilai ini diperoleh ketika turbin dikenai aliran air sebesar 2 m/s.

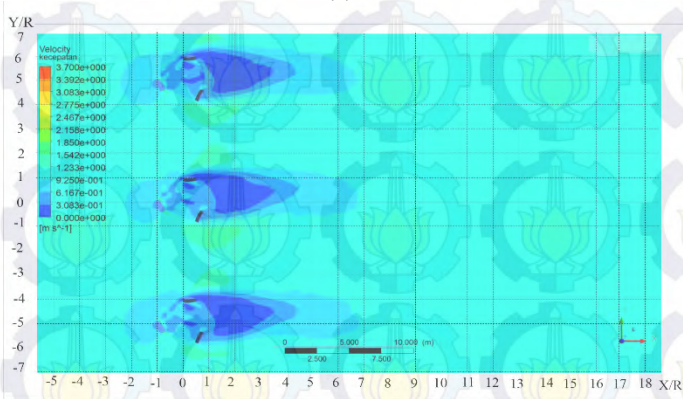
#### 4.3.2 Profil *Wake* untuk Desain *Array I*

Besarnya kecepatan aliran air yang mengenai turbin sangat berpengaruh terhadap panjang *wake* dan profil kecepatan yang dihasilkan. Gambar 4.10 menunjukkan profil kecepatan yang dihasilkan oleh *array I* untuk variasi kecepatan 0,5 m/s; 1 m/s; 1.5 m/s dan 2 m/s.

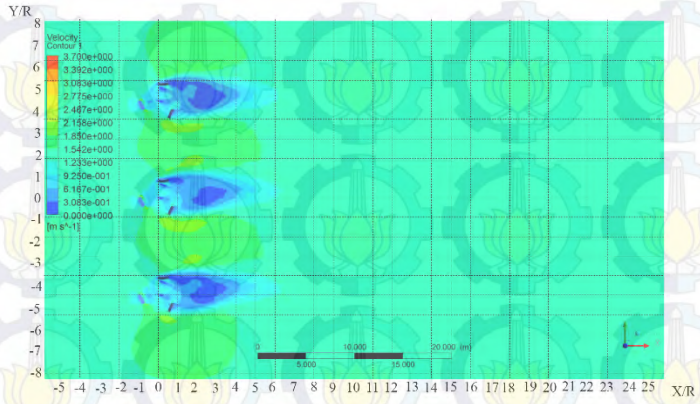




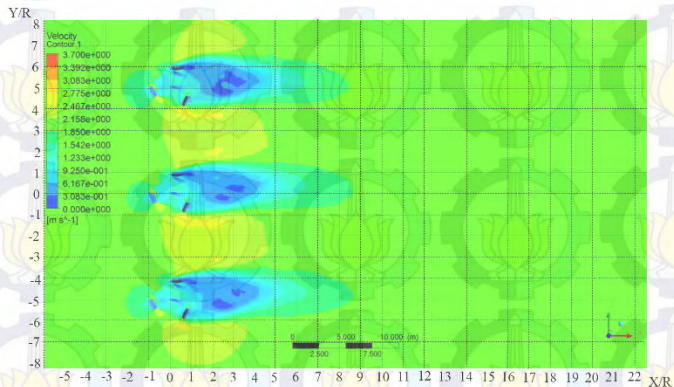
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.10.** Profil *Wake Array I* untuk Kecepatan Aliran arus laut: (a) 0,5 m/s; (b) 1 m/s; (c) 1,5 m/s; (d) 2 m/s

Dari hasil simulasi menunjukkan profil *wake* yang dihasilkan oleh masing-masing turbin pada *array I* hampir sama dengan profil *wake* yang dihasilkan oleh *stand alone turbine*. *Wake* terpendek terjadi ketika turbin mendapatkan kecepatan aliran 0,5 m/s. Dari gambar 4.10 (a) terlihat bahwa



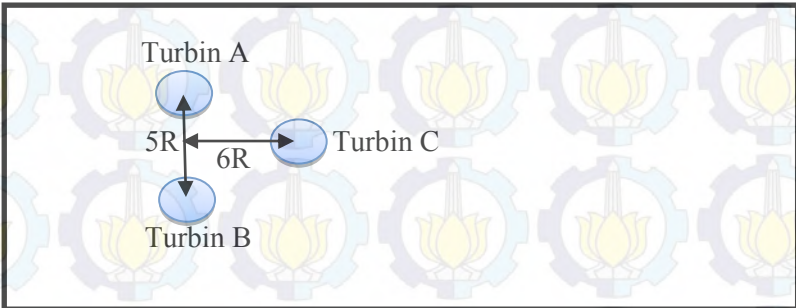
panjang *wake* yang dihasilkan untuk *array* I pada kecepatan aliran 0,5 m/s adalah 3,25 R. Dimana R merupakan jari-jari turbin. Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa interaksi aliran fluida diantara turbin belum terjadi.

Sementara itu *wake* terpanjang terjadi ketika turbin mendapatkan kecepatan aliran arus 2 m/s. Dari gambar 4.10 (d) dapat diketahui bahwa kecepatan aliran terkonservasi setelah 8,5R. Terjadi interaksi fluida akibat pergerakan masing-masing turbin yang berpengaruh terhadap panjang *wake*. Terlihat bahwa kecepatan aliran di sisi kanan dan kiri turbin lebih besar dari kecepatan aliran arus laut (*Free Stream*). Hal ini mengakibatkan performansi dari masing-masing turbin meningkat, sehingga efisiensi *farm* juga meningkat. Interaksi fluida ini mulai terjadi ketika turbin mendapatkan kecepatan 1,5 m/s, sehingga efisiensi *farm* memiliki nilai lebih dari 1 pada kecepatan 1,5 m/s dan 2 m/s, seperti terlihat pada tabel 4.3.

#### 4.4 Desain Array II

Salah satu parameter yang harus dipertimbangkan ketika mendesain suatu *array* turbin adalah lokasi pemasangan *array*. Untuk memperoleh efisiensi *array* yang tinggi maka dibutuhkan lokasi laut yang memiliki kecepatan arus yang tinggi. Namun, lokasi dengan karakteristik seperti ini biasanya hanya memiliki area yang sempit. Oleh karena itu, optimalisasi area pemasangan untuk mendapatkan efisiensi *farm* yang tinggi perlu dilakukan.

Untuk memaksimalkan penggunaan lokasi pemasangan *farm*, maka dilakukan pendesaian *array* II. Pada *array* II ini turbin ditempatkan dalam konfigurasi *zig-zag*. Jarak antara *upstream turbine* dan *downstream* turbin adalah 6R. Sementara itu jarak antar turbin yang disusun dalam 1 baris adalah 5R. Gambar 4.11 menunjukkan skema konfigurasi *array* II.



**Gambar 4.11.** Skema konfigurasi *array* II

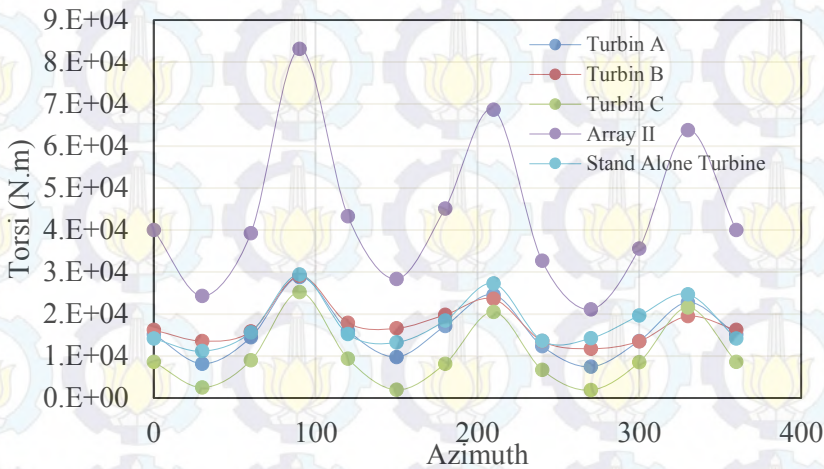
#### 4.4.1 Torsi dan Gaya untuk Desain *Array* II

Besarnya torsi dan gaya yang dihasilkan oleh turbin pada *array* II berubah selama turbin berputar. Perubahan ini membentuk pola sinusoidal, fenomena ini juga terjadi pada *stand alone* turbine dan *array* I. Seperti telah disebutkan sebelumnya, fenomena ini terjadi akibat perubahan *angle of attack* selama turbin berputar. Gambar 4.12 dan 4.13 menunjukkan pola perubahan torsi dan gaya yang dihasilkan oleh *array* II untuk kecepatan 0,5 m/s.

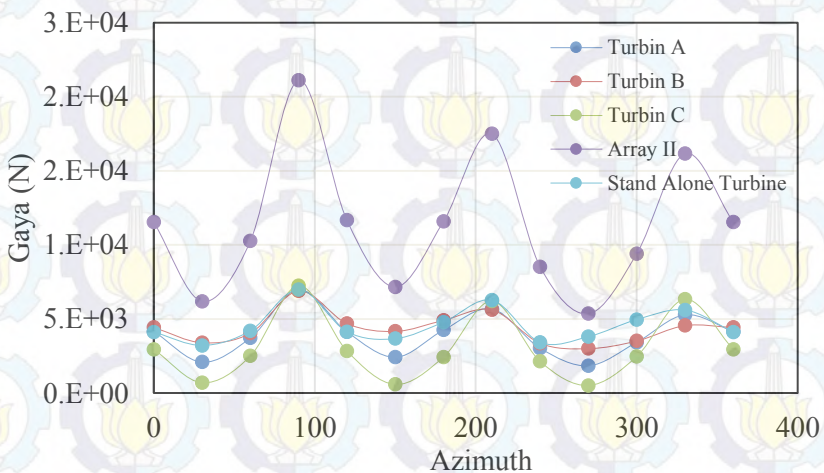
Dari gambar 4.12 dan 4.13 menunjukkan bahwa turbin C menghasilkan torsi dan gaya yang lebih kecil dari *stand alone turbine*, turbin A dan turbin B. Hal ini terjadi karena pengaruh *wake* dari turbin *upstream*.

Tabel 4.4 menunjukkan nilai torsi total yang dihasilkan oleh masing-masing turbin dan *array* II. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa torsi terbesar dihasilkan ketika turbin mendapatkan arus sebesar 2 m/s. Besarnya torsi terbesar yang dapat dihasilkan adalah 143645,7 N.m dengan efisiensi *farm* 1,1. Nilai ini menunjukkan bahwa *array* mampu menghasilkan torsi yang lebih besar dari pada 3 buah *stand alone turbine* yang dikenai kecepatan aliran 2 m/s.





**Gambar 4.12.** Torsi yang dihasilkan oleh *Array II* untuk kecepatan 0,5 m/s



**Gambar 4.13.** Gaya yang dihasilkan oleh *Array II* untuk kecepatan 0,5 m/s

**Tabel 4.4.** Torsi yang dihasilkan oleh *Array II*

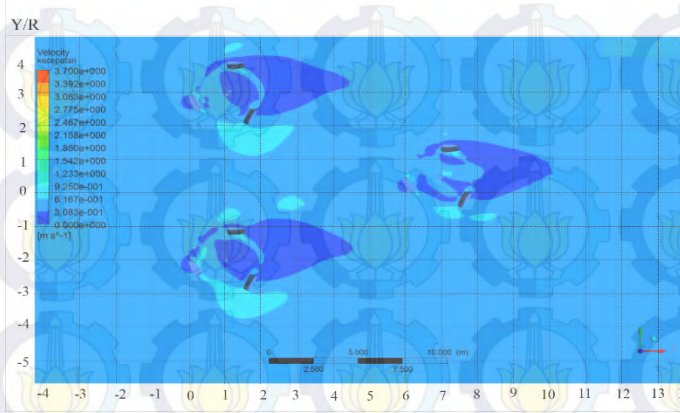
Kec (m/s)	Torsi			Torsi Total	Torsi Stand Alone	Efisien Farm
	Turbin A	Turbin B	Turbin C			
0.5	15802.5	17472.6	10206.9	43482.1	17763.3	0.8
1	48898.3	54166.2	31919.2	134983.7	56428.6	0.8
1.5	100572.9	111152.9	67105.3	278831.1	94058.1	1.0
2	170738.4	188111.7	115389.4	474239.5	143645.7	1.1

#### 4.4.2 Profil Wake untuk Desain *Array II*

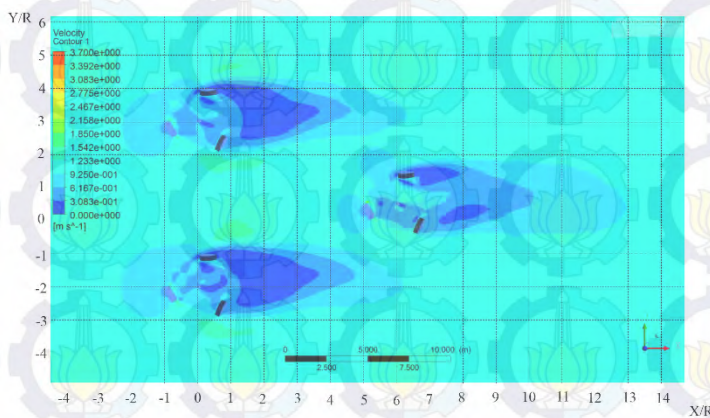
Gambar 4.14 menunjukkan profil *wake* yang dihasilkan oleh *array II* pada variasi kecepatan 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s dan 2 m/s. Masing-masing variasi kecepatan menghasilkan interaksi aliran yang berbeda-beda. Dari gambar tersebut terlihat bahwa *wake* terpanjang terjadi ketika turbin mendapatkan kecepatan aliran 2 m/s. Panjang *wake* yang dihasilkan oleh turbin *upstream* berbeda dengan turbin *downstream*. Turbin *upstream* menghasilkan *wake* dengan panjang 7,5 R, sementara itu turbin *downstream* menghasilkan *wake* yang lebih panjang yaitu 8,5 R. Panjang daerah *near wake* yang dihasilkan adalah 4,25 R. Hal ini terjadi karena kecepatan *free stream* yang diterima oleh turbin C masih belum laminar, akibat proses ekstraksi energi pada turbin A dan B (*Upstream turbine*).

Tabel 4.4 dan gambar 4.14 menunjukkan bahwa turbin *downstream* mengalami penurunan performansi. Torsi dan gaya yang dihasilkan oleh turbin *downstream* lebih kecil dari pada *stand alone turbine*. Hal ini terjadi karena pengaruh *wake* yang dihasilkan oleh turbin *upstream*. Efek buruk ini dapat dihindari dengan menambah jarak pemasangan antara turbin *upstream* dan turbin *downstream*, dengan catatan bahwa aliran yang mengenai *downstream* sama atau lebih baik dari aliran yang mengenai *upstream*. Namun, pada umumnya *site* pemasangan turbin yang memiliki karakteristik arus yang baik memiliki area yang terbatas.

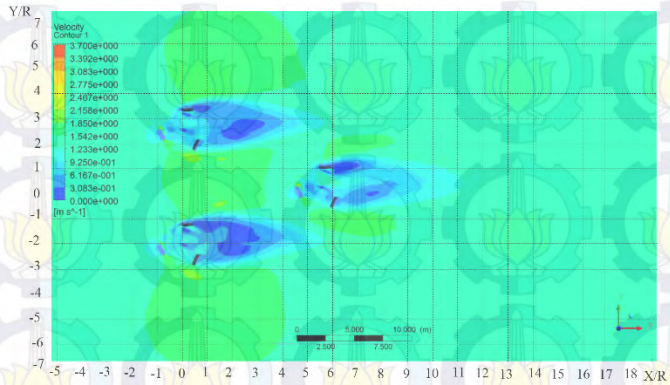




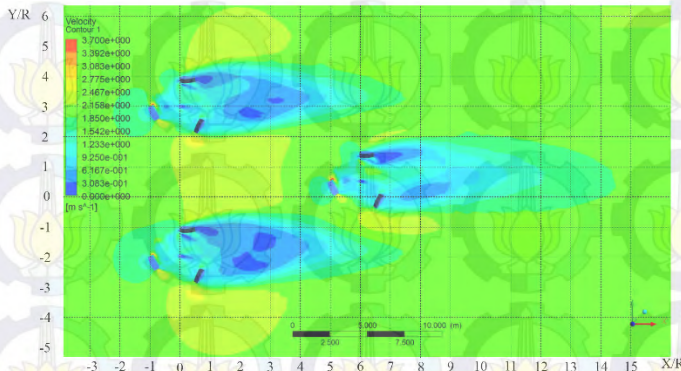
(a)



(b)



(c)



(d)

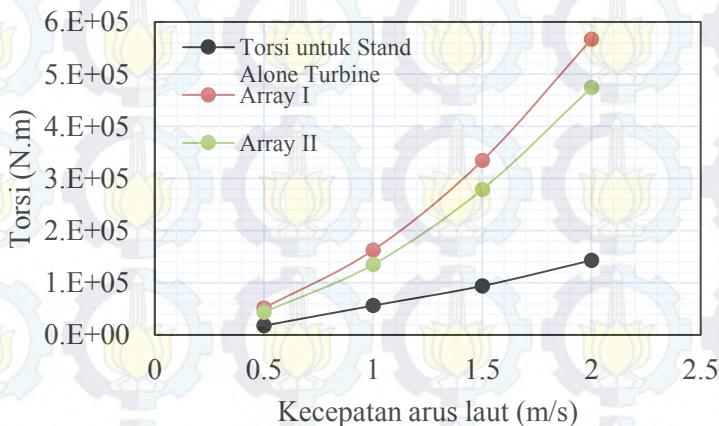
**Gambar 4.14.** Profil *Wake Array II* untuk Kecepatan arus laut: (a) 0,5 m/s; 1 m/s; 1,5 m/s; (d) 2 m/s

#### 4.5 Diskusi

Turbin arus laut merupakan salah satu jenis teknologi energi baru terbarukan yang banyak dikembangkan. Salah satu parameter penting yang harus diperhatikan ketika mendesain turbin arus laut adalah kecepatan arus. Besarnya kecepatan arus laut yang mengenai turbin sangat berpengaruh terhadap torsi dan



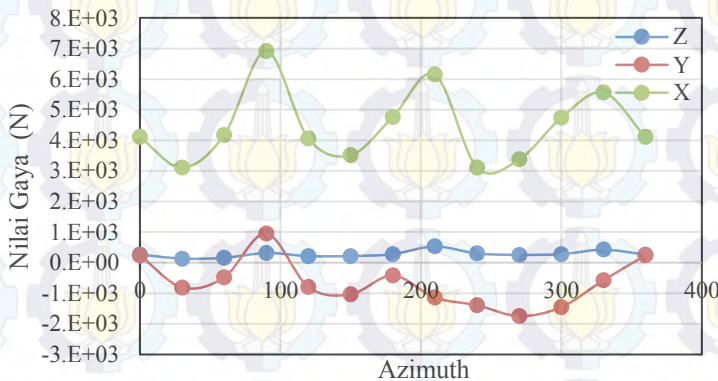
gaya yang dihasilkan oleh turbin tersebut. Gambar 4.15 menunjukkan hubungan torsi yang dihasilkan oleh turbin *stand alone* dan *array* turbin terhadap kecepatan arus laut. Berdasarkan gambar tersebut, semakin besar kecepatan arus laut maka semakin besar torsi yang mampu dihasilkan oleh turbin. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak energi yang mampu diekstrak oleh turbin tersebut. Fenomena tersebut terjadi untuk semua susunan turbin, baik untuk turbin *stand alone*, *array I* dan *array II*.



**Gambar 4.15.** Hubungan Kecepatan dan Torsi

Nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin sangat bergantung pada besarnya gaya yang dihasilkan. Gambar 4.16 menunjukkan pola gaya yang dihasilkan oleh *stand alone turbine* selama berputar. Gaya yang dihasilkan oleh turbin dalam *array* juga menunjukkan pola yang sama dengan gambar 4.16. Posisi *Blade* yang miring pada turbin *V-Blade Darrieus* menyebabkan turbin ini menghasilkan gaya ke arah *x*, *y*, dan *z*. Namun gaya arah *z* tidak menghasilkan torsi pada turbin. Gaya ke arah *z* ini relative kecil sehingga bisa diabaikan. Nilai gaya *z* yang terlalu besar

akan menyebabkan getaran pada turbin dan akan membahayakan turbin tersebut.



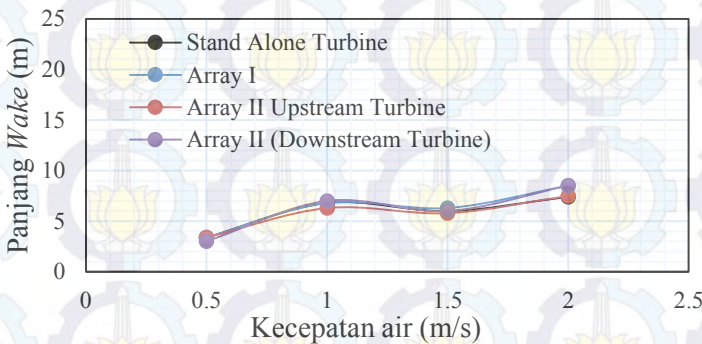
**Gambar 4.16.** Gaya yang dihasilkan *Stand alone turbine* selama berputar

Selain berpengaruh terhadap besarnya torsi yang mampu dihasilkan oleh turbin, besarnya kecepatan arus juga berpengaruh terhadap panjang *wake* yang dihasilkan turbin. Panjang *wake* dinyatakan dalam  $X/R$ , dimana  $X$  adalah panjang *wake* dibelakang turbin dan  $R$  adalah jari-jari turbin. Gambar 4.17 menunjukkan pengaruh kecepatan arus laut terhadap panjang *wake* yang dihasilkan oleh turbin.

Dari gambar 4.17 terlihat bahwa semakin besar kecepatan arus laut, maka panjang *wake* cenderung menunjukkan pola pertambahan panjang. Pada daerah *wake* terjadi transfer energi. Transfer energi terjadi antara lingkungan yang berkecepatan lebih tinggi dengan *wake* yang berkecepatan lebih rendah sehingga kecepatan pada daerah *wake* dapat terkonservasi kembali ke kecepatan arus semula (*free stream*). Semakin sedikit selisih energi antara daerah *wake* dan lingkungan, maka semakin mudah *wake* untuk terkonservasi, dengan kata lain panjang *wake* yang dihasilkan akan lebih pendek.

Panjang *wake* pada turbin *upstream* sangat berpengaruh terhadap performansi turbin *downstream*. Dari hasil simulasi *array II*, terlihat bahwa turbin C yang terletak pada bagian

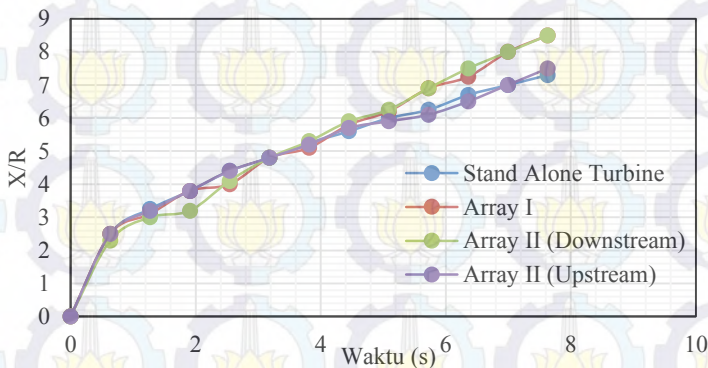
*downstream* menghasilkan torsi yang lebih kecil dari turbin *stand alone*, turbin A dan turbin B. Hal ini terjadi karena pengaruh *wake* yang dihasilkan oleh turbin *upstream*, sehingga kecepatan arus laut yang mengenai turbin C lebih kecil dari kecepatan yang mengenai turbin A dan B. Posisi pemasangan turbin *downstream* pada sebuah *array* akan sangat berpengaruh terhadap performansinya. Panjang *wake* turbin *upstream* merupakan salah satu pertimbangan penting untuk mendesain *array* dengan efisiensi yang tinggi.



**Gambar 4.17.** Hubungan Kecepatan Arus Laut dan Panjang wake

Selain panjang *wake* dibelakang turbin, ekstraksi energi yang dilakukan oleh turbin juga menyebabkan kecepatan pada sisi kanan dan kiri turbin lebih besar dari kecepatan *free stream*. Dapat dilihat pada gambar 4.6, bahwa kecepatan di bagian sisi turbin lebih tinggi dari kecepatan arus yang mengenai turbin. Kecepatan yang lebih tinggi disisi kanan dan kiri turbin ini, menyebabkan terjadinya interaksi aliran arus diantara turbin yang tersusun dalam suatu *array*. Fenomena interaksi antar turbin dalam *array* dapat terlihat pada gambar 4.10 (c), 4.10 (d), 4.14 (c) dan 4.14 (d). Akibat fenomena tersebut, turbin mampu menghasilkan torsi yang lebih besar dari turbin *stand alone* sehingga meningkatkan efisiensi *farm*.

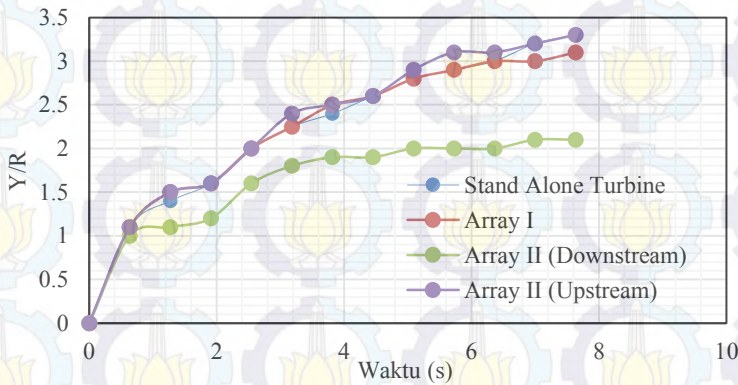




**Gambar 4.18.** Grafik Hubungan Waktu Putar Turbin dan Panjang *Wake*

Berdasarkan simulasi, diperoleh hasil bahwa panjang *wake* dibelakang dan daerah berkecepatan tinggi di sisi turbin bertambah seiring dengan lamanya waktu turbin berotasi. Gambar 4.18 dan 4.19 menunjukkan pengaruh waktu perputaran turbin terhadap panjang *wake* ( $X/R$ ) dan panjang daerah berkecepatan tinggi di sisi turbin ( $Y/R$ ).

Dari gambar 4.18 dan 4.19 terlihat bahwa, semakin lama maka panjang *wake* dan panjang interaksi aliran di samping turbin juga semakin bertambah. Pada saat awal turbin berputar, belum terjadi interaksi aliran diantara turbin. Sementara itu semakin lama turbin berputar maka semakin banyak interaksi aliran yang terjadi. Interaksi ini merupakan gabungan dari banyak *vortex* yang dihasilkan oleh turbin. *Vortex-vortex* ini berinteraksi satu sama lain dan menimbulkan *vortex* yang lebih kompleks, sehingga *wake* yang dihasilkan akan semakin panjang. Perlu dilakukan penelitian lanjut untuk mengetahui efek lama turbin berputar terhadap panjang *wake* yang dihasilkan oleh turbin.



**Gambar 4.19.** Grafik Hubungan Waktu Putar Turbin dan Panjang Interaksi Aliran di Samping Turbin

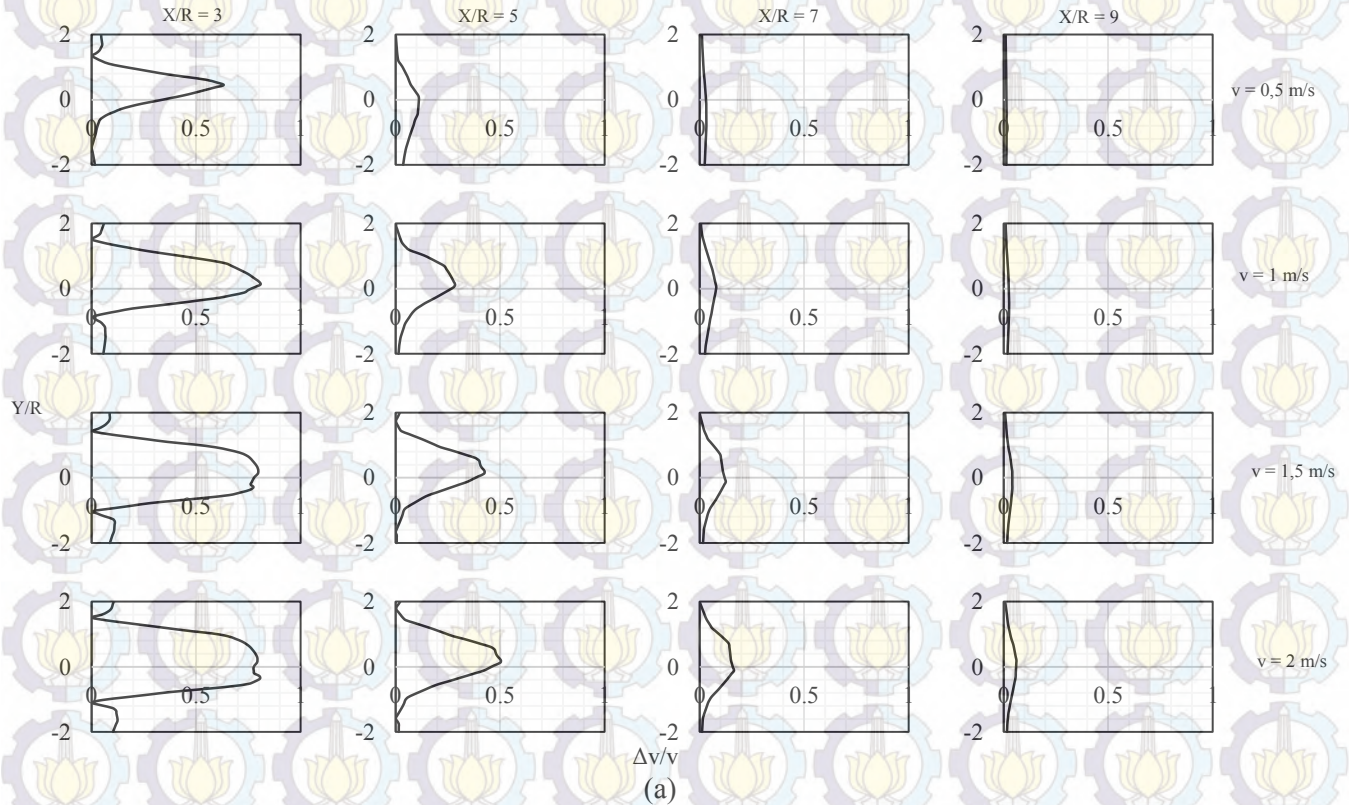
Gambar 4.20 (a-c) menunjukkan profil penurunan kecepatan ( $\Delta v/v$ ) arus laut untuk variasi lokasi *downstream* tertentu ( $X/R=3,5,7,9$ ). Dari ketiga gambar tersebut dapat terlihat bahwa penurunan kecepatan arus laut memenuhi distribusi Gaussian. Semakin jauh lokasi *downstream* dari turbin, maka penurunan kecepatan semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa semakin jauh jarak suatu lokasi *downstream* dari turbin, maka kecepatan pada lokasi tersebut semakin mendekati kecepatan *free stream* atau dengan kata lain kecepatan arus laut sudah terkonservasi. Pada gambar 4.20 c terlihat bahwa penurunan kecepatan turbin A dan B pada *array* II mengalami gangguan sehingga penurunan kecepatannya tidak membentuk distribusi Gaussian yang baik, terutama pada  $X/R=7$ . Hal ini terjadi karena terjadinya interaksi antara *wake* turbin A dan B dengan aliran yang sudah terganggu akibat pergerakan turbin C. Dari gambar 4.20 juga dapat diketahui bahwa semakin besar kecepatan arus, maka *wake* akan semakin sulit untuk terkonservasi.

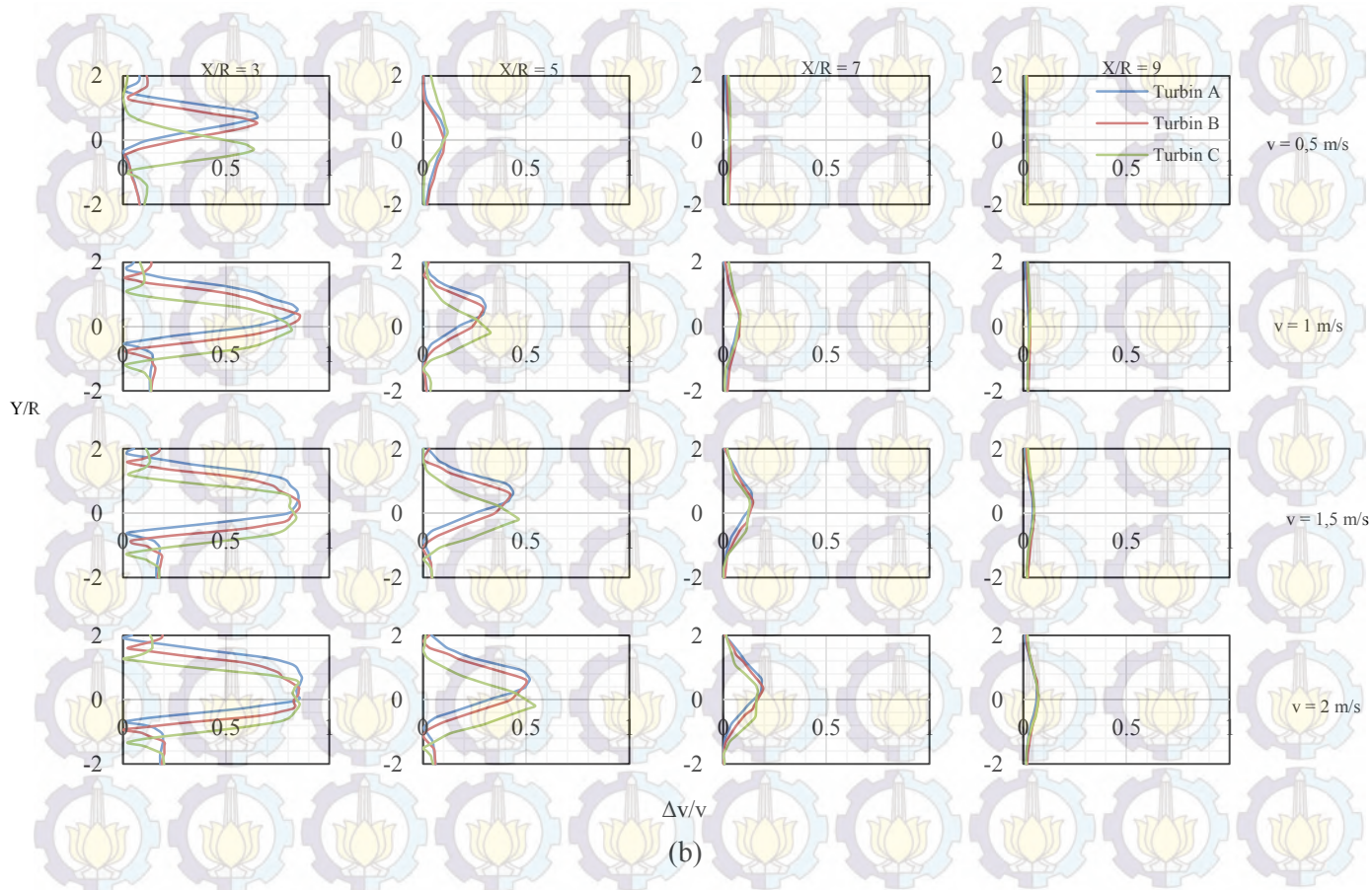
Pada tugas akhir ini, didesain dua jenis *array* yang berbeda. *Array* I merupakan susunan turbin dalam satu baris. Skema konfigurasi turbin *array* I dapat dilihat pada gambar 4.7. Sementara itu *Array* II disusun dalam konfigurasi *zig-zag* seperti

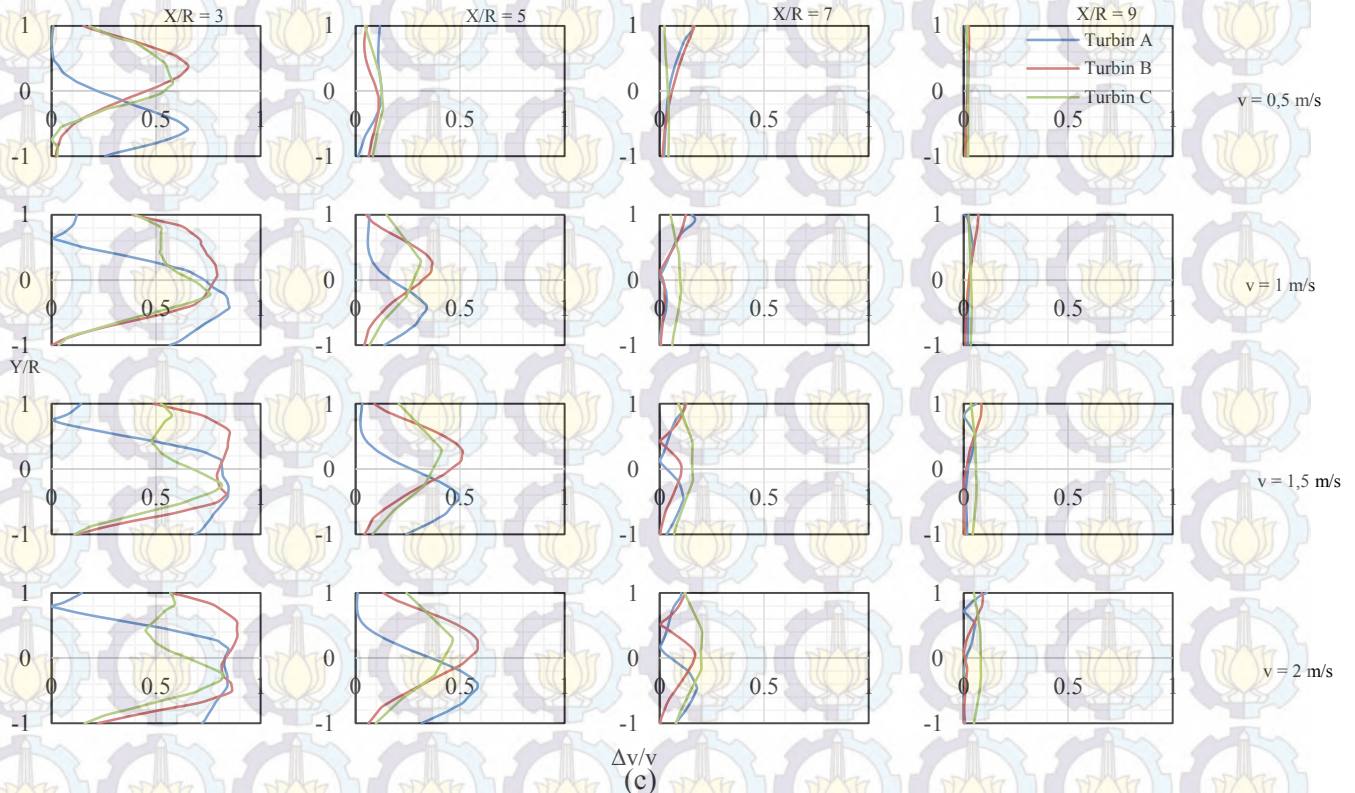
ditunjukkan pada gambar 4.11. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa *array* I memiliki efisiensi *farm* yang lebih baik dari pada turbin II. Efisiensi *farm* yang tinggi pada *array* I dikarenakan semua turbin pada *array* I merupakan turbin *upstream*. Semua turbin *upstream* mendapatkan kecepatan *free stream* yang sama

Sementara itu pada *array* II, turbin C yang merupakan turbin *downstream* mendapat kecepatan yang lebih kecil karena dipengaruhi *wake* dari turbin *upstream* (turbin A dan B). Akibat hal tersebut, turbin C menghasilkan torsi yang lebih kecil daripada turbin *stand alone*, turbin A dan turbin B, sehingga performansinya mengalami penurunan. Namun apabila lokasi pemasangan turbin tidak terlalu luas, maka *array* II lebih cocok untuk diterapkan. Alasannya adalah *array* II memiliki efisiensi yang cukup tinggi dan tidak membutuhkan lokasi pemasangan yang luas. Sementara itu *array* I cocok diterapkan untuk lokasi pemasangan yang luas.









**Gambar 4.20.** Profil Penurunan Kecepatan (a) *Stand Alone Turbin*, (b) *Array I*, (c) *Array II*



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *wake* terpanjang yang dihasilkan *stand alone turbine* terjadi ketika kecepatan arus laut 2 m/s. Pada kecepatan tersebut, *wake* akan terkonservasi setelah 7,5 R. Setelah jarak 7,5R *downstream*, kecepatan aliran arus laut kembali kecepatan semula yaitu 2 m/s. *Wake* terkonservasi karena adanya transfer momentum dan energi antara daerah di sekitar turbin dan daerah *wake*. *Wake* terpanjang yang dihasilkan oleh *array I* adalah 8,5R. Sedangkan pada *array II*, *wake* terpanjang dihasilkan oleh *downstream turbine* (Turbin C), yaitu 8,5R.
- b. *Wake* memiliki efek buruk terhadap turbin bagian *downstream*. Dari hasil simulasi *array II* dapat diketahui bahwa torsi yang dihasilkan oleh turbin C (turbin *downstream*) lebih kecil dari torsi yang dihasilkan oleh *stand alone turbine*. Hal ini karena turbin C masih mendapatkan pengaruh *wake* dari turbin A dan B (*Upstream*). Dari hasil simulasi, *array* yang mampu menghasilkan performansi lebih baik adalah *array I*. Terdapat interaksi aliran antar turbin *upstream* dalam satu baris yang menyebabkan peningkatan performansi dari masing-masing turbin. Interaksi aliran ini mulai muncul ketika aliran arus laut yang mengenai turbin 1,5 m/s.

## 5.2 Saran

Berikut ini adalah saran yang diberikan peneliti oleh untuk keberlanjutan penelitian yang dilakukan:

- a. Perlu dilakukan analisis interaksi aliran fluida dalam satu baris *array* terhadap performansi turbin. Analisa tersebut meliputi seberapa panjang daerah terjadinya interaksi aliran sehingga dapat diprediksi jarak pesangan antar turbin upstream (tersusun dalam satu baris) dengan tepat.
- b. Perlu dilakukan analisis pengaruh pertambahan waktu terhadap panjang *wake* yang dihasilkan oleh turbin.
- c. Perlu dilakukan penelitian eksperimental untuk memperkuat hasil simulasi yang telah dilakukan.

## LAMPIRAN A

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 0,5 m/s

Azi muth	Foil 1 (N.m)			Foil 2 (N.m)			Foil 3 (N.m)			Shaft (N.m)			Jumlah X (N.m)	Jumlah Y (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	-7610.7	4329.0	-1495.6	-943.9	3074.5	866.2	7232.6	5612.6	-1652.9	87.7	1079.5	0.3	-1234.3	14095.5	14149.5
30	-619.0	373.4	137.9	-976.0	1328.0	273.4	4275.8	8249.8	-1219.2	67.9	869.2	0.2	2748.7	10820.4	11164.1
60	2794.2	2282.3	589.5	-1135.7	-699.8	479.5	414.3	13119.6	-1188.5	-15.6	794.5	0.2	2057.1	15496.5	15632.5
90	4076.3	9324.8	1547.8	4302.9	-52.1	-285.7	-11868.2	19527.0	-3150.5	70.1	441.9	0.1	-3418.9	29241.5	29440.7
120	59.0	3377.1	431.3	7296.2	7607.0	-2423.4	-5267.6	3764.7	-454.0	196.4	303.3	0.1	2284.0	15052.1	15224.4
150	-284.9	629.2	32.1	4682.3	11403.2	-1897.8	-1161.0	365.2	89.2	203.6	385.8	0.0	3440.0	12783.4	13238.2
180	265.1	-1028.8	192.3	-631.8	17363.5	-1964.0	2039.7	1581.0	373.2	129.0	411.2	0.0	1802.0	18326.9	18415.2
210	12219.6	860.4	-1717.3	-11101.2	19290.2	-2690.0	3122.5	6388.9	880.0	122.2	397.8	0.0	4363.1	26937.3	27288.4
240	9006.3	8065.5	-2273.0	-4497.1	3156.6	-402.0	509.1	867.1	-158.2	242.4	525.7	0.0	5260.7	12614.8	13667.8
270	4883.7	12531.6	-2117.2	286.6	298.3	211.1	840.4	-665.7	-289.0	253.9	599.5	0.0	6264.6	12763.6	14218.2
300	-942.3	17227.7	-2034.1	3934.2	2338.0	451.0	2244.5	-1153.1	-330.4	199.2	452.2	0.0	5435.6	18864.8	19632.2
330	-10209.1	17981.1	-2518.3	3864.9	5365.1	434.5	9397.3	866.6	-1346.6	260.4	266.0	0.0	3313.5	24478.8	24702.1
360	-7610.7	4329.0	-1495.6	-943.9	3074.5	866.2	7232.6	5612.6	-1652.9	87.7	1079.5	0.3	-1234.3	14095.5	14149.5
RATA-RATA TORSI TOTAL (N.m)															17763.28



## LAMPIRAN B

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 0,5 m/s

Azi muth	Foil 1 (N)			Foil 2 (N)			Foil 3 (N)			Shaft (N)			Jumlah X (N)	Jumlah Y (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	1217.4	2185.7	192.5	960.9	301.4	-125.5	1655.2	-2226.5	196.0	273.0	-22.8	0.0	4106.6	237.9	4113.5
30	122.8	86.2	-10.6	398.5	305.1	-62.1	2362.6	-1187.3	200.5	221.3	-16.2	0.1	3105.2	-812.3	3209.7
60	633.0	-768.1	-108.6	-119.7	340.7	-21.2	3464.3	-62.5	281.5	195.3	7.9	0.2	4173.0	-482.1	4200.8
90	2218.1	-923.4	-221.3	-3.4	-926.1	67.9	4602.9	2820.9	465.8	103.1	-21.0	0.6	6920.6	950.5	6985.6
120	945.2	35.9	-110.0	2048.5	-2115.3	208.3	988.8	1344.9	112.7	73.5	-63.8	0.3	4056.0	-798.4	4133.8
150	188.3	92.9	-29.2	3111.3	-1301.4	253.0	122.1	232.1	-10.8	94.0	-63.4	-0.1	3515.7	-1039.7	3666.2
180	-210.4	-65.2	12.6	4468.4	184.4	352.5	408.2	-512.5	-88.6	95.1	-27.1	-0.9	4761.2	-420.3	4779.7
210	207.8	-3071.9	252.9	4496.3	2586.6	427.9	1365.1	-642.1	-146.4	87.5	-15.9	-0.7	6156.6	-1143.3	6261.8
240	2030.6	-2361.4	232.1	828.3	1118.3	86.5	138.5	-111.3	-19.8	115.0	-38.8	-0.1	3112.3	-1393.2	3409.9
270	3282.2	-1331.5	267.5	107.3	-163.9	-42.0	-143.9	-217.4	26.8	128.4	-36.1	0.3	3374.0	-1748.9	3800.3
300	4353.1	226.8	340.5	620.6	-1021.4	-132.6	-326.1	-639.4	67.2	87.4	-22.9	0.3	4735.0	-1456.9	4954.0
330	4196.2	2373.7	395.5	1153.6	-829.5	-142.9	179.5	-2079.1	170.2	39.2	-45.6	0.6	5568.5	-580.4	5598.7
360	1217.4	2185.7	192.5	960.9	301.4	-125.5	1655.2	-2226.5	196.0	273.0	-22.8	0.0	4106.6	237.9	4113.5
<b>RATA –RATA GAYA TOTAL (N)</b>															<b>4555.9</b>

## LAMPIRAN C

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 1 m/s

Azi muth	Foil 1 (N.m)			Foil 2 (N.m)			Foil 3 (N.m)			Shaft (N.m)			Jumlah X (N.m)	Jumlah Y (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	-21530.7	12659.5	-4240.5	-2441.9	14054.4	3194.2	18676.5	13808.3	-4295.2	322.2	4017.6	0.8	-4973.9	44539.8	44816.7
30	-233.7	920.5	419.0	-4311.2	5806.9	1233.8	12997.6	22920.1	-3031.0	234.1	3440.4	0.6	8686.9	33087.9	34209.2
60	9756.0	7131.8	1724.5	-6102.3	-24.9	1714.7	2167.7	36862.5	-2973.0	-96.4	2869.2	0.5	5725.0	46838.7	47187.3
90	15428.3	33740.0	5431.4	21325.1	2567.1	-2762.7	-33308.2	55068.9	-9196.6	179.8	1377.6	0.3	3625.0	92753.6	92824.4
120	-845.5	14079.0	2205.6	18181.0	18783.2	-5745.4	-10641.9	9114.9	-590.6	744.0	1166.4	0.2	7437.6	43143.5	43779.9
150	-2192.0	3456.8	488.6	14555.7	33609.7	-5297.2	1157.2	1542.1	969.1	905.4	2075.2	0.0	14426.4	40683.8	43165.9
180	1564.6	-1340.4	-31.6	-849.7	47605.3	-5125.5	9628.6	6929.2	1784.0	289.3	2815.0	0.0	10632.8	56009.0	57009.4
210	27004.8	3693.5	-4173.9	-29676.4	53862.4	-7271.0	12238.5	22612.2	3159.5	265.2	2559.8	0.1	9832.1	82727.9	83310.1
240	22431.1	21316.8	-6187.5	-10032.1	8717.0	-459.4	1252.0	4803.3	-23.3	1283.0	2725.9	0.2	14934.0	37563.0	40422.8
270	14938.7	36460.8	-5985.8	2908.5	1377.8	1117.2	1129.1	665.5	-640.4	1629.9	3277.3	0.1	20606.2	41781.4	46586.5
300	-1324.0	49964.9	-5418.1	12409.7	7567.6	1696.4	2135.9	392.6	-717.9	1162.7	3084.9	0.0	14384.3	61009.9	62682.7
330	-28759.4	53371.3	-6956.2	13438.9	20724.5	2409.2	21965.1	4376.8	-3945.5	1381.4	2278.4	-0.1	8026.0	80750.9	81148.8
360	-21530.7	12659.5	-4240.5	-2441.9	14054.4	3194.2	18676.5	13808.3	-4295.2	322.2	4017.6	0.8	-4973.9	44539.8	44816.7
RATA –RATA TORSI TOTAL (N.m)															55535.41



## LAMPIRAN D

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 1 m/s

Azi muth	Foil 1 (N)			Foil 2 (N)			Foil 3 (N)			Shaft (N)			Jumlah X (N)	Jumlah Y (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	3551.4	6220.4	552.4	4222.3	789.3	-536.3	4322.2	-5847.8	503.7	1015.8	-86.6	0.3	13111.6	1075.4	13155.6
30	262.1	-146.8	-48.2	1712.6	1344.9	-260.9	6515.6	-3544.5	581.4	874.8	-60.3	0.2	9365.1	-2406.6	9669.4
60	1946.1	-2632.4	-347.4	146.3	1843.6	-144.1	9691.8	-437.9	815.7	693.5	38.7	0.9	12477.7	-1188.0	12534.1
90	8035.9	-3515.3	-786.3	676.7	-5247.3	443.7	12898.3	7861.3	1331.8	282.5	-42.2	2.9	21893.3	-943.5	21913.7
120	3867.2	334.7	-443.1	5107.6	-5125.0	516.6	2348.9	2694.3	251.7	216.0	-182.6	2.4	11539.7	-2278.6	11762.5
150	1035.8	669.3	-132.9	9046.5	-3969.9	760.7	457.7	-623.1	-115.9	457.6	-137.6	-1.4	10997.6	-4061.3	11723.5
180	-325.7	-386.8	40.0	12212.9	287.3	977.7	1933.3	-2630.6	-377.7	625.6	-17.3	-0.6	14446.1	-2747.3	14705.0
210	819.3	-5954.8	497.7	12598.6	6935.3	1218.3	5221.0	-2744.6	-556.8	548.6	-17.6	2.2	19187.5	-1781.6	19270.0
240	5404.8	-5814.8	603.0	2227.9	2447.3	210.5	1031.1	-273.7	-128.5	613.6	-276.1	1.2	9277.4	-3917.2	10070.5
270	9547.4	-3972.4	810.2	417.8	-1128.8	-160.8	96.6	-341.8	-1.7	768.5	-360.4	-0.1	10830.2	-5803.4	12287.1
300	12632.9	355.9	1015.1	2106.5	-3380.2	-425.7	119.1	-443.7	24.2	691.6	-234.8	0.9	15550.2	-3702.8	15984.9
330	12434.7	6680.7	1189.1	4878.9	-3094.4	-544.0	1027.6	-4878.4	403.6	470.3	-308.1	1.6	18811.5	-1600.2	18879.4
360	3551.4	6220.4	552.4	4222.3	789.3	-536.3	4322.2	-5847.8	503.7	1015.8	-86.6	0.3	13111.6	1075.4	13155.6
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)															14239.343



## LAMPIRAN E

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 1,5 m/s

Azi muth	Foil 1 (N.m)			Foil 2 (N.m)			Foil 3 (N.m)			Shaft (N.m)			Jumlah X (N.m)	Jumlah Y (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	-40850.4	23320.6	-8365.3	-5634.0	31503.8	7206.1	34722.0	24863.3	-7846.9	606.8	8835.4	0.4	-11155.6	88523.1	89223.3
30	208.0	1640.2	780.9	-10694.2	12408.7	3255.3	23322.5	41115.1	-5461.1	374.8	7667.2	0.3	13211.1	62831.3	64205.2
60	19186.4	14122.7	3362.5	-11481.8	819.1	3151.0	6160.9	63191.2	-3992.5	-265.4	6229.2	0.1	13600.1	84362.2	85451.4
90	33272.1	71053.7	11376.8	42280.0	6506.6	-6310.2	-65805.9	109224.0	-18704.2	594.9	3130.6	0.4	10341.1	189914.9	190196.3
120	-2567.2	28266.6	4733.7	26628.2	25109.4	-8066.9	-17552.6	15628.5	-915.6	1894.9	2710.8	1.0	8403.2	71715.3	72205.9
150	-5651.3	6764.8	1524.6	21136.7	38006.5	-5166.5	5061.6	3052.8	2078.2	2016.4	4859.2	0.4	22563.3	52683.3	57311.7
180	-4471.2	-2009.2	2095.5	5610.7	57416.0	-3571.8	20706.5	15675.0	4043.5	1237.8	6153.2	0.4	23083.9	77234.9	80610.8
210	41227.1	5058.3	-6344.5	-62641.5	103080.0	-17963.7	22329.7	47353.7	7442.6	1105.5	4494.4	0.7	2020.8	159986.3	159999.1
240	22820.1	22322.2	-7361.7	-17591.6	14853.2	-1214.6	-565.9	10748.6	1401.8	1660.4	3208.3	0.9	6323.0	51132.3	51521.7
270	19628.3	35724.0	-4923.6	4790.7	2337.0	1732.4	-8704.8	8541.1	2551.5	1705.7	4152.5	0.7	17420.0	50754.6	53660.8
300	5505.2	56321.5	-3521.4	18646.3	13808.8	3536.0	3531.3	-7507.8	1460.2	951.0	5187.4	0.4	28633.8	67809.9	73607.6
330	-61796.5	101854.0	-17692.6	18607.2	40008.0	6546.2	47568.8	4721.5	-6851.8	1029.4	4023.2	0.6	5408.9	150606.7	150703.8
360	-40850.4	23320.6	-8365.3	-5634.0	31503.8	7206.1	34722.0	24863.3	-7846.9	606.8	8835.4	0.4	-11155.6	88523.1	89223.3
RATA-RATA TORSI TOTAL (N.m)															94058.12

## LAMPIRAN F

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 1,5 m/s

Azi muth	Foil 1 (N)			Foil 2 (N)			Foil 3 (N)			Shaft (N)			Jumlah X (N)	Jumlah Y (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	6721.0	11950.5	1059.0	9597.7	1667.8	-1254.3	7836.4	-10700.5	914.7	2226.4	-170.0	5.7	26381.4	2747.8	26524.1
30	440.8	-398.2	-91.1	3867.8	3310.2	-621.2	11709.7	-6359.2	1132.8	1940.7	-101.5	5.4	17959.0	-3548.6	18306.2
60	3738.5	-5059.5	-652.1	340.0	3524.4	-305.3	16883.5	-1389.7	1436.9	1496.1	99.7	5.9	22458.2	-2825.2	22635.2
90	16939.3	-7615.6	-1669.8	1728.3	-10630.5	923.7	25631.1	15584.1	2670.0	633.5	-122.9	9.8	44932.1	-2784.9	45018.4
120	7883.5	780.4	-938.3	7332.7	-7861.8	691.5	4069.0	4472.9	442.6	513.3	-436.5	9.1	19798.4	-3045.0	20031.2
150	2088.8	1626.4	-293.6	10786.1	-5653.5	991.5	850.6	-1883.7	-251.2	1128.5	-476.2	4.4	14854.0	-6387.0	16169.0
180	-330.1	1654.0	-133.0	15212.4	-1220.0	1268.3	4294.0	-5631.3	-776.9	1430.9	-272.6	5.2	20607.2	-5469.9	21320.8
210	1284.1	10574.2	902.9	24134.3	14888.2	2561.7	11207.9	-5130.6	-1139.1	974.0	-249.3	7.9	37600.3	-1065.9	37615.4
240	6575.6	-6686.3	599.7	3861.3	4499.9	448.2	2727.3	113.2	-307.8	653.5	-387.6	6.2	13817.7	-2460.7	14035.1
270	10109.5	-5212.9	916.1	664.7	-1768.7	-231.1	2530.7	2460.0	-416.1	967.5	-407.9	6.3	14272.3	-4929.5	15099.7
300	14895.9	-1191.0	1238.4	3804.8	-5081.9	-705.2	-1869.4	-824.0	119.5	1222.9	-199.1	5.7	18054.2	-7295.9	19472.7
330	23764.4	14646.3	2529.4	9630.1	-4330.4	-1016.6	1274.8	-10964.1	952.3	889.6	-236.8	7.2	35558.9	-885.0	35569.9
360	6721.0	11950.5	1059.0	9597.7	1667.8	-1254.3	7836.4	-10700.5	914.7	2226.4	-170.0	5.7	26381.4	2747.8	26524.1
RATA – RATA GAYA TOTAL (N)															24486.3



## LAMPIRAN G

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 2 m/s

Azi muth	Foil 1 (N.m)			Foil 2 (N.m)			Foil 3 (N.m)			Shaft (N.m)			Jumlah X (N.m)	Jumlah Y (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	-67492.5	38644.6	-13806.0	-8957.4	55870.2	12391.9	55957.5	39642.7	-12520.6	1052.8	15480.2	0.5	-19439.6	149637.7	150895.1
30	683.6	2547.0	1231.5	-18860.2	21734.5	5761.4	39096.3	67652.1	-8774.2	606.6	13564.5	0.3	21526.3	105498.1	107671.8
60	31412.1	22513.5	5310.4	-17830.6	1375.6	4924.7	10674.9	104682.0	-6410.2	-518.6	10708.8	0.0	23737.8	139279.9	141288.3
90	57084.2	120441.0	19307.9	64886.0	11983.9	-10494.9	-108760.0	181332.0	-31156.6	1245.1	5248.9	0.8	14455.3	319005.8	319333.1
120	-4231.5	47550.5	7863.2	48144.7	44547.4	-14051.9	-27510.7	25233.5	-1380.3	3358.2	4737.6	1.4	19760.7	122069.0	123658.1
150	-10357.8	11901.5	2780.0	35677.0	63158.8	-8446.4	10295.7	4934.8	3545.1	3242.2	9019.2	0.5	38857.1	89014.3	97125.8
180	-8557.1	-1771.1	3280.0	9886.9	95136.7	-5644.9	36238.3	26899.6	6854.8	1745.9	11031.2	0.4	39314.0	131296.4	137056.0
210	72512.6	9220.1	-11334.3	-105192.0	174657.0	-30488.3	38700.6	80213.1	12701.9	1479.8	7312.9	1.0	7501.0	271403.0	271506.7
240	41839.6	37698.4	-12205.0	-27833.3	24335.4	-1847.7	-1537.9	20864.1	2986.3	2900.3	5230.7	1.5	15368.6	88128.6	89458.6
270	23524.0	-21056.1	138.6	1202.9	236.0	-90.9	22500.1	-24408.1	1327.3	2930.2	7840.6	0.9	50157.2	-37387.6	62558.6
300	-47931.3	28563.6	-9902.9	-1258.9	15563.7	2217.0	49706.2	44908.6	-12983.9	2474.3	13974.3	0.0	2990.3	103010.2	103053.6
330	8324.3	1691.8	1639.4	-6941.2	15362.9	389.7	26198.6	73064.1	-13480.2	699.3	19175.1	-0.4	28280.9	109293.9	112893.6
360	-67492.5	38644.6	-13806.0	-8957.4	55870.2	12391.9	55957.5	39642.7	-12520.6	1052.8	15480.2	0.5	-19439.6	149637.7	150895.1
RATA-RATA TORSI TOTAL (N.m)															143645.7



## LAMPIRAN H

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Stand alone turbin* pada kecepatan arus 2 m/s

Azi muth	Foil 1 (N)			Foil 2 (N)			Foil 3 (N)			Shaft (N)			Jumlah X (N)	Jumlah Y (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z			
0	11159.1	19805.3	1759.4	16944.8	2682.2	-2217.2	12539.6	-17194.5	1481.8	3899.6	-299.6	10.6	44543.1	4993.4	44822.1
30	660.5	-733.9	-150.6	6768.1	5831.6	-1097.2	19239.6	-10613.5	1890.2	3430.5	-165.0	9.2	30098.7	-5680.9	30630.1
60	5947.1	-8247.2	-1063.9	534.4	5483.5	-460.5	27915.7	-2444.3	2399.8	2568.3	191.1	9.6	36965.5	-5016.8	37304.4
90	28727.9	-13088.9	-2843.5	3102.0	-16300.7	1418.5	42533.2	25744.4	4434.3	1062.0	-264.6	16.6	75425.0	-3909.8	75526.3
120	13128.5	1262.6	-1577.6	12847.0	-13975.6	1265.7	6561.9	7045.2	715.9	932.3	-785.0	14.8	33469.7	-6452.8	34086.0
150	3594.5	2871.3	-506.8	17929.0	-9529.0	1679.5	1337.3	-3627.4	-436.6	2120.4	-780.5	8.6	24981.2	-11065.6	27322.3
180	-101.3	3073.6	-270.3	25185.3	-2220.8	2128.9	7364.7	-9843.2	-1335.3	2552.8	-351.5	10.4	35001.4	-9341.9	36226.7
210	2426.7	-18479.1	1582.2	40905.8	24993.4	4327.6	19206.4	-8989.2	-1974.4	1571.9	-308.4	13.4	64110.8	-2783.3	64171.2
240	11189.7	-12313.2	1089.7	6318.8	7167.3	733.3	5414.7	371.8	-640.0	1082.1	-697.5	8.6	24005.3	-5471.6	24621.0
270	-305.8	-268.0	119.7	119.6	-212.7	-66.6	-834.7	-448.5	76.4	1884.2	-737.3	8.7	863.4	-1666.5	1876.9
300	8110.1	13974.6	1305.5	4166.1	250.9	-509.7	11677.8	-13923.4	1187.8	3457.6	-605.1	8.8	27411.6	-303.0	27413.3
330	435.4	-2592.2	-282.3	3904.5	1543.3	-497.8	19720.8	-7157.6	1596.8	4756.4	-120.2	13.6	28817.0	-8326.5	29995.8
360	11159.1	19805.3	1759.4	16944.8	2682.2	-2217.2	12539.6	-17194.5	1481.8	3899.6	-299.6	10.6	44543.1	4993.4	44822.1
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)															36166.3

## LAMPIRAN I

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array I* pada kecepatan arus 0,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin C (N.m)			Turbin A (N.m)	Turbin B (N.m)	Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	7545.5	17198.5	-47833.6	1374.5	15609.5	-2356.5	-1256.3	16634.2	42116.6	18780.9	15669.9	16681.6	51132.4
30	4043.9	12540.3	-31102.9	2285.6	10277.6	-781.0	948.2	11307.3	27489.1	13176.2	10528.7	11347.0	35051.9
60	2546.2	16585.4	-42009.5	1941.2	14698.5	147.8	408.6	16387.3	41342.4	16779.7	14826.1	16392.4	47998.2
90	-2843.8	28276.5	-69430.7	-4421.2	28951.7	-1663.8	-7491.7	27937.1	65626.0	28419.1	29287.3	28924.2	86630.6
120	8333.6	18190.7	-47911.2	3821.5	16051.6	-2514.4	2513.3	17206.9	41391.3	20008.8	16500.2	17389.5	53898.5
150	5849.8	15358.7	-38371.4	3281.1	12917.6	-1747.4	1090.8	14180.9	32102.9	16435.0	13327.8	14222.8	43985.6
180	4377.2	20088.1	-50557.6	2385.0	17812.0	-1181.6	-949.6	19558.1	46606.9	20559.5	17971.0	19581.1	58111.6
210	5042.3	24572.5	-2698.9	8626.3	23421.9	-57472.1	10.1	23004.2	51362.9	25084.5	24959.9	23004.2	73048.7
240	8643.6	12852.0	-32929.5	3749.2	11296.7	-2325.2	2672.3	12558.2	27960.1	15488.2	11902.6	12839.4	40230.2
270	6105.4	10159.1	-25851.7	4423.1	8561.6	-1472.0	2933.7	9577.0	21425.1	11852.6	9636.6	10016.3	31505.4
300	6922.8	13738.7	-35113.7	5844.5	12332.3	-489.9	3171.7	13685.3	33508.4	15384.3	13647.1	14048.0	43079.5
330	6064.3	19187.7	-47519.8	2854.8	21676.7	-2096.0	111.5	19044.2	42742.6	20123.2	21863.9	19044.5	61031.6
360	7545.5	17198.5	-47833.6	1374.5	15609.5	-2356.5	-1256.3	16634.2	42116.6	18780.9	15669.9	16681.6	51132.4
RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)										18528.7	16599.3	16936.3	52064.3



## LAMPIRAN J

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array I* pada kecepatan arus 0,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Turbin A (N)	Turbin B (N)	Turbin C (N)	Total Gaya (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	4560.2	-653.6	342.2	4426.1	-296.5	295.0	4452.7	-324.2	328.7	4606.8	4436.1	4464.5	13507.3
30	3033.3	-524.4	172.2	2983.5	-659.7	140.2	2807.0	-560.7	142.6	3078.3	3055.6	2862.5	8996.4
60	4187.2	-438.9	169.5	3964.2	-476.1	117.2	4134.1	-489.7	161.5	4210.1	3992.7	4163.0	12365.9
90	6793.4	1247.3	273.0	6871.2	1120.6	286.6	6717.9	1064.4	276.2	6907.0	6962.0	6801.7	20670.6
120	4549.8	-1347.8	240.2	4346.3	-1089.4	228.0	4396.8	-1242.3	240.5	4745.2	4480.8	4568.9	13794.9
150	3659.4	-794.4	251.7	3585.7	-968.4	208.3	3364.7	-783.8	215.6	3744.6	3714.1	3454.8	10913.6
180	4907.0	-375.1	283.4	4726.2	-569.6	256.0	4792.9	-452.6	284.1	4921.3	4760.4	4814.2	14495.9
210	5477.3	-1174.9	478.8	5683.7	-1236.5	478.9	5400.7	-1336.2	472.7	5601.9	5816.6	5563.5	16982.0
240	3052.6	-1310.0	281.9	2845.2	-983.3	248.2	3051.7	-1339.2	269.4	3321.8	3010.3	3332.6	9664.6
270	2426.0	-964.5	224.5	2469.8	-1254.6	166.2	2271.8	-1194.6	191.4	2610.7	2770.2	2566.8	7947.6
300	3426.9	-1305.0	197.4	3314.9	-1526.4	163.6	3412.2	-1338.0	189.2	3667.0	3649.5	3665.1	10981.6
330	4533.4	-104.0	351.3	4924.9	-120.7	343.3	4489.3	-295.7	348.6	4534.6	4926.3	4499.1	13960.0
360	4560.2	-653.6	342.2	4426.1	-296.5	295.0	4452.7	-324.2	328.7	4606.8	4436.1	4464.5	13507.3
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)										4350.5	4308.5	4247.8	12906.8



## LAMPIRAN K

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 1 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin C (N.m)			Turbin A (N.m)	Turbin B (N.m)	Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	17571.3	56838.5	-155711.0	2211.5	49325.7	-5963.9	-2333.2	53399.0	137138.0	59492.6	49375.2	53450.0	162317.8
30	10552.8	39303.4	-95833.1	6949.9	31311.5	-1157.9	3357.1	35638.7	87256.8	40695.4	32073.5	35796.5	108565.4
60	6432.6	50046.8	-124446.0	4625.0	44124.2	1135.3	872.6	49367.7	124342.0	50458.5	44365.9	49375.4	144199.8
90	10836.7	90371.7	-222886.0	3339.6	93541.4	-6290.8	-5800.9	90481.9	211176.0	91019.1	93601.0	90667.7	275287.8
120	19010.8	53237.4	-135971.0	12309.1	47137.1	-4406.7	10376.5	49825.8	121799.0	56529.9	48717.8	50894.8	156142.5
150	19117.9	49853.2	-122735.0	13681.8	40826.3	-3729.4	7686.9	45775.9	107053.0	53393.2	43057.8	46416.8	142867.9
180	17831.2	59986.8	-151352.0	11510.7	55299.9	-2964.2	3774.0	58122.0	140278.0	62580.9	56485.2	58244.4	177310.5
210	13427.8	74151.7	-181550.0	5726.6	77246.3	-5682.5	-1589.8	71804.0	164444.0	75357.7	77458.3	71821.6	224637.6
240	20950.0	37407.9	-97566.1	12706.8	35673.0	-5758.7	8904.1	36353.8	84075.6	42874.9	37868.5	37428.4	118171.7
270	17672.3	31524.6	-78370.8	13633.0	26414.3	-2728.0	10707.5	27909.0	66142.9	36140.2	29725.0	29892.5	95757.6
300	14788.6	43854.8	-112604.0	14416.5	39598.2	-257.4	10140.0	43056.8	109682.0	46281.2	42140.9	44234.7	132656.7
330	8253.9	70999.3	-176979.0	3798.3	76035.0	-6880.8	-5360.0	69403.9	160474.0	71477.5	76129.8	69610.6	217217.8
360	17571.3	56838.5	-155711.0	2211.5	49325.7	-5963.9	-2333.2	53399.0	137138.0	59492.6	49375.2	53450.0	162317.8
<b>RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)</b>										57368.7	52336.5	53175.6	162880.8

## LAMPIRAN L

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array I* pada kecepatan arus 1 m/s

Azi muth	Turbin A (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin B (N)	Total Gaya (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	14976.6	-1451.0	755.0	14248.4	-389.4	611.8	14326.6	-598.6	706.1	15046.7	14253.7	14339.1	43639.6
30	9462.2	-1461.7	393.9	8951.9	-1918.8	313.1	8788.2	-1474.9	308.5	9574.4	9155.2	8911.1	27640.8
60	12501.9	-766.1	351.0	11836.8	-1031.2	214.5	12347.4	-1057.2	339.1	12525.3	11881.6	12392.6	36799.6
90	21709.9	-641.3	947.5	22116.4	-852.6	966.4	21707.2	-1106.3	938.3	21719.4	22132.8	21735.4	65587.6
120	13199.9	-3477.3	383.5	12602.9	-3212.8	389.8	12633.8	-3500.8	399.2	13650.2	13006.0	13109.8	39766.1
150	11858.3	-2953.2	655.6	11246.4	-3897.8	512.1	11039.1	-3136.3	524.2	12220.5	11902.7	11476.0	35599.2
180	14756.7	-2678.5	736.8	14516.7	-2976.4	548.1	14351.8	-2773.3	696.0	14997.8	14818.7	14617.3	44433.8
210	17599.8	-797.1	926.8	18066.6	-862.5	925.0	17032.4	-1697.7	954.6	17617.8	18087.2	17116.8	52821.8
240	9195.9	-3443.1	666.0	9094.7	-3366.0	625.7	9008.8	-3998.2	672.2	9819.4	9697.5	9856.1	29373.0
270	7471.4	-2983.2	542.4	7414.9	-3969.0	373.3	6833.4	-3674.3	403.2	8044.9	8410.4	7758.6	24213.9
300	11174.8	-2926.8	316.7	10825.6	-3602.4	211.3	11001.0	-3365.6	318.6	11551.7	11409.3	11504.3	34465.3
330	17093.4	42.5	903.7	17829.8	-811.2	998.8	16707.5	-1092.6	962.0	17093.5	17848.2	16743.2	51684.9
360	14976.6	-1451.0	755.0	14248.4	-389.4	611.8	14326.6	-598.6	706.1	15046.7	14253.7	14339.1	43639.6
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)										13762.2	13604.4	13376.9	40743.5



## LAMPIRAN M

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array I* pada kecepatan arus 1,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin C (N.m)			Torsi Turbin A (N.m)	Torsi Turbin B (N.m)	Torsi Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	29930.0	116200.0	-317000.0	1910.0	100000.0	-10690.0	-4574.0	108300.0	280300.0	119992.7	100018.2	108396.5	328407.5
30	19050.0	80060.0	-193700.0	13160.0	63730.0	-1756.0	6514.0	73170.0	179500.0	82295.2	65074.6	73459.4	220829.2
60	12800.0	98800.0	-244400.0	10030.0	86910.0	2133.0	1716.0	97620.0	244700.0	99625.7	87486.9	97635.1	284747.6
90	29210.0	185000.0	-456500.0	11010.0	191300.0	-13100.0	-4413.0	185200.0	431200.0	187291.8	191616.6	185252.6	564161.0
120	41840.0	106800.0	-271000.0	30070.0	95210.0	-8044.0	26880.0	100500.0	245100.0	114703.2	99845.6	104032.6	318581.4
150	40460.0	100400.0	-247800.0	29860.0	83790.0	-7188.0	18860.0	93430.0	220000.0	108245.9	88951.6	95314.6	292512.0
180	30290.0	125200.0	-317000.0	22870.0	116100.0	-5290.0	9750.0	121200.0	295600.0	128812.0	118331.1	121591.5	368734.6
210	20490.0	153700.0	-377100.0	12350.0	159400.0	-10990.0	-4005.0	147300.0	340700.0	155059.8	159877.7	147354.4	462291.9
240	40050.0	76190.0	-199800.0	25680.0	72420.0	-10400.0	20660.0	73690.0	173900.0	86075.1	76838.3	76531.4	239444.7
270	31350.0	65740.0	-162100.0	26140.0	55150.0	-3918.0	21300.0	59740.0	143600.0	72832.5	61031.3	63423.6	197287.4
300	32070.0	88510.0	-226300.0	32620.0	80910.0	86.0	25300.0	87070.0	222400.0	94140.9	87238.1	90671.2	272050.3
330	18780.0	155400.0	-387300.0	5654.0	164300.0	-13490.0	-9566.0	149100.0	345600.0	156530.7	164397.3	149406.6	470334.5
360	29930.0	116200.0	-317000.0	1910.0	100000.0	-10690.0	-4574.0	108300.0	280300.0	119992.7	100018.2	108396.5	328407.5
RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)										117353.7	107748.1	109343.5	334445.4



## LAMPIRAN N

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array I* pada kecepatan arus 1,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin B (N)	Gaya Turbin C (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	3.1E+04	-2.2E+03	1.3E+03	2.9E+04	-6.4E+01	1.0E+03	2.9E+04	-6.3E+02	1.2E+03	3.1E+04	2.9E+04	2.9E+04	8.9E+04
30	1.9E+04	-2.6E+03	7.0E+02	1.8E+04	-3.6E+03	5.5E+02	1.8E+04	-2.7E+03	5.3E+02	1.9E+04	1.8E+04	1.8E+04	5.6E+04
60	2.5E+04	-1.6E+03	7.1E+02	2.3E+04	-2.2E+03	4.6E+02	2.4E+04	-2.2E+03	7.1E+02	2.5E+04	2.3E+04	2.4E+04	7.2E+04
90	4.4E+04	-2.7E+03	1.9E+03	4.5E+04	-2.7E+03	1.9E+03	4.4E+04	-3.5E+03	1.8E+03	4.4E+04	4.5E+04	4.5E+04	1.3E+05
120	2.6E+04	-8.0E+03	7.3E+02	2.5E+04	-7.7E+03	7.7E+02	2.5E+04	-8.4E+03	7.8E+02	2.8E+04	2.6E+04	2.7E+04	8.1E+04
150	2.4E+04	-6.5E+03	1.3E+03	2.3E+04	-8.6E+03	9.9E+02	2.3E+04	-7.0E+03	1.0E+03	2.5E+04	2.4E+04	2.4E+04	7.3E+04
180	3.1E+04	-4.8E+03	1.2E+03	3.1E+04	-5.9E+03	8.0E+02	3.0E+04	-5.3E+03	1.1E+03	3.1E+04	3.1E+04	3.1E+04	9.3E+04
210	3.7E+04	-1.2E+03	1.6E+03	3.8E+04	-2.4E+03	1.7E+03	3.5E+04	-3.3E+03	1.7E+03	3.7E+04	3.8E+04	3.5E+04	1.1E+05
240	1.9E+04	-6.7E+03	1.2E+03	1.9E+04	-6.8E+03	1.1E+03	1.8E+04	-8.3E+03	1.2E+03	2.0E+04	2.0E+04	2.0E+04	6.0E+04
270	1.6E+04	-5.4E+03	8.9E+02	1.5E+04	-7.7E+03	5.7E+02	1.5E+04	-6.8E+03	6.0E+02	1.7E+04	1.7E+04	1.6E+04	5.0E+04
300	2.3E+04	-6.7E+03	5.6E+02	2.2E+04	-8.2E+03	3.5E+02	2.2E+04	-7.9E+03	6.1E+02	2.4E+04	2.4E+04	2.4E+04	7.1E+04
330	3.7E+04	-3.6E+02	1.7E+03	3.9E+04	-1.1E+03	1.8E+03	3.6E+04	-2.3E+03	1.8E+03	3.7E+04	3.9E+04	3.6E+04	1.1E+05
360	3.1E+04	-2.2E+03	1.3E+03	2.9E+04	-6.4E+01	1.0E+03	2.9E+04	-6.3E+02	1.2E+03	3.1E+04	2.9E+04	2.9E+04	8.9E+04
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)										2.8E+04	2.8E+04	2.8E+04	8.4E+04

## LAMPIRAN O

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array I* pada kecepatan arus 2 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin C (N.m)			Torsi Turbin A (N.m)	Torsi Turbin B (N.m)	Torsi Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	44420.0	195300.0	-531400.0	657.0	168100.0	-16560.0	-7858.0	181300.0	471600.0	200287.9	168101.3	181470.2	549859.4
30	29780.0	135000.0	-325200.0	21270.0	107400.0	-2372.0	10620.0	123900.0	304100.0	138245.6	109485.9	124354.3	372085.9
60	23140.0	162900.0	-402200.0	18340.0	143400.0	3197.0	3560.0	160900.0	402200.0	164535.3	144568.0	160939.4	470042.7
90	48110.0	311400.0	-767300.0	16820.0	321700.0	-21500.0	-5585.0	311300.0	724600.0	315094.5	322139.4	311350.1	948584.0
120	75230.0	179600.0	-454700.0	55340.0	160300.0	-13420.0	50550.0	169200.0	411600.0	194719.6	169583.6	176589.8	540893.0
150	69450.0	169800.0	-419300.0	51600.0	143000.0	-11850.0	34230.0	159000.0	375300.0	183453.9	152024.9	162642.8	498121.6
180	46280.0	214200.0	-542300.0	38650.0	198000.0	-8443.0	18200.0	207200.0	506600.0	219142.6	201737.0	207997.8	628877.4
210	37540.0	262200.0	-644600.0	23470.0	271700.0	-18360.0	-1811.0	250300.0	580800.0	264873.7	272711.8	250306.6	787892.1
240	62500.0	127700.0	-335100.0	43330.0	122400.0	-15840.0	37530.0	124300.0	296800.0	142174.3	129843.2	129842.2	401859.7
270	49920.0	112200.0	-275700.0	43780.0	94060.0	-5664.0	36700.0	102600.0	248000.0	122804.1	103749.6	108966.3	335519.9
300	54260.0	150500.0	-384000.0	53880.0	139300.0	715.0	44190.0	149300.0	380900.0	159982.5	149357.1	155702.4	465042.0
330	28720.0	274400.0	-681200.0	9958.0	286300.0	-21950.0	-14380.0	260800.0	606100.0	275898.9	286473.1	261196.1	823568.2
360	44420.0	195300.0	-531400.0	657.0	168100.0	-16560.0	-7858.0	181300.0	471600.0	200287.9	168101.3	181470.2	549859.4
RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)										198577.0	182913.6	185602.2	567092.7



## LAMPIRAN P

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array I* pada kecepatan arus 2 m/s

Azi muth	Turbin (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin B (N)	Gaya Turbin C (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	5.1E+04	-3.0E+03	1.9E+03	4.9E+04	6.4E+02	1.5E+03	4.9E+04	-4.5E+02	1.7E+03	5.2E+04	4.9E+04	4.9E+04	1.5E+05
30	3.2E+04	-4.1E+03	1.1E+03	3.0E+04	-5.7E+03	8.5E+02	3.0E+04	-4.2E+03	8.2E+02	3.3E+04	3.1E+04	3.1E+04	9.4E+04
60	4.0E+04	-3.0E+03	1.2E+03	3.8E+04	-4.1E+03	8.4E+02	4.0E+04	-4.2E+03	1.3E+03	4.1E+04	3.8E+04	4.0E+04	1.2E+05
90	7.5E+04	-4.4E+03	3.0E+03	7.6E+04	-4.0E+03	2.9E+03	7.5E+04	-5.4E+03	2.9E+03	7.5E+04	7.6E+04	7.5E+04	2.3E+05
120	4.4E+04	-1.4E+04	1.3E+03	4.2E+04	-1.4E+04	1.3E+03	4.3E+04	-1.5E+04	1.4E+03	4.7E+04	4.5E+04	4.5E+04	1.4E+05
150	4.1E+04	-1.1E+04	2.2E+03	3.9E+04	-1.5E+04	1.6E+03	3.9E+04	-1.2E+04	1.6E+03	4.2E+04	4.2E+04	4.0E+04	1.2E+05
180	5.3E+04	-7.6E+03	1.7E+03	5.2E+04	-9.8E+03	1.1E+03	5.2E+04	-8.7E+03	1.5E+03	5.4E+04	5.3E+04	5.2E+04	1.6E+05
210	6.3E+04	-3.0E+03	2.6E+03	6.4E+04	-4.9E+03	2.8E+03	6.0E+04	-6.6E+03	2.8E+03	6.3E+04	6.4E+04	6.0E+04	1.9E+05
240	3.2E+04	-1.1E+04	1.8E+03	3.2E+04	-1.1E+04	1.6E+03	3.1E+04	-1.4E+04	1.8E+03	3.4E+04	3.4E+04	3.4E+04	1.0E+05
270	2.7E+04	-8.8E+03	1.3E+03	2.6E+04	-1.3E+04	8.5E+02	2.5E+04	-1.1E+04	8.8E+02	2.8E+04	2.9E+04	2.7E+04	8.5E+04
300	3.8E+04	-1.1E+04	8.9E+02	3.8E+04	-1.4E+04	4.6E+02	3.8E+04	-1.3E+04	9.4E+02	4.0E+04	4.0E+04	4.0E+04	1.2E+05
330	6.6E+04	-4.2E+02	2.7E+03	6.8E+04	-2.0E+03	2.9E+03	6.3E+04	-4.0E+03	3.0E+03	6.6E+04	6.8E+04	6.3E+04	2.0E+05
360	5.1E+04	-3.0E+03	1.9E+03	4.9E+04	6.4E+02	1.5E+03	4.9E+04	-4.5E+02	1.7E+03	5.2E+04	4.9E+04	4.9E+04	1.5E+05
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)										4.8E+04	4.8E+04	4.7E+04	1.4E+05



## LAMPIRAN Q

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 0,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin C (N.m)			Torsi Turbin A (N.m)	Torsi Turbin B (N.m)	Torsi Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	9.1E+02	1.5E+04	-2.3E+04	3.6E+03	1.6E+04	1.9E+04	-4.1E+03	7.6E+03	9.2E+03	1.5E+04	1.6E+04	8.6E+03	4.0E+04
30	1.6E+03	8.0E+03	-1.1E+04	2.3E+03	1.3E+04	1.5E+04	-3.5E+02	2.5E+03	4.5E+02	8.2E+03	1.4E+04	2.5E+03	2.4E+04
60	2.9E+03	1.4E+04	-1.8E+04	1.2E+03	1.6E+04	2.0E+04	3.0E+03	8.5E+03	-7.1E+03	1.4E+04	1.6E+04	9.0E+03	3.9E+04
90	-2.4E+03	2.9E+04	-3.6E+04	-6.7E+03	2.8E+04	3.2E+04	-2.7E+03	2.5E+04	4.8E+03	2.9E+04	2.9E+04	2.5E+04	8.3E+04
120	3.0E+03	1.6E+04	-2.3E+04	6.2E+03	1.7E+04	1.9E+04	-1.7E+03	9.2E+03	-2.1E+02	1.6E+04	1.8E+04	9.4E+03	4.3E+04
150	2.3E+03	9.5E+03	-1.3E+04	3.2E+03	1.6E+04	1.8E+04	-4.2E+02	1.9E+03	2.9E+02	9.8E+03	1.7E+04	2.0E+03	2.8E+04
180	3.3E+03	1.7E+04	-2.2E+04	4.2E+02	2.0E+04	2.3E+04	3.8E+03	7.3E+03	-9.5E+03	1.7E+04	2.0E+04	8.2E+03	4.5E+04
210	5.8E+03	2.4E+04	-3.1E+04	2.3E+03	2.3E+04	2.5E+04	3.3E+03	2.0E+04	-1.4E+04	2.5E+04	2.4E+04	2.1E+04	6.9E+04
240	3.8E+03	1.2E+04	-1.7E+04	5.9E+03	1.2E+04	1.2E+04	-9.2E+02	6.7E+03	-2.3E+03	1.2E+04	1.4E+04	6.7E+03	3.3E+04
270	4.2E+03	6.1E+03	-8.7E+03	3.2E+03	1.1E+04	1.2E+04	7.5E+02	1.8E+03	-2.4E+03	7.4E+03	1.2E+04	1.9E+03	2.1E+04
300	6.0E+03	1.2E+04	-1.6E+04	4.6E+03	1.3E+04	1.5E+04	6.3E+03	5.7E+03	-1.8E+04	1.4E+04	1.4E+04	8.5E+03	3.6E+04
330	4.1E+03	2.2E+04	-2.9E+04	1.9E+03	1.9E+04	2.0E+04	5.4E+03	2.1E+04	-1.5E+04	2.3E+04	1.9E+04	2.2E+04	6.4E+04
360	9.1E+02	1.5E+04	-2.3E+04	3.6E+03	1.6E+04	1.9E+04	-4.1E+03	7.6E+03	9.2E+03	1.5E+04	1.6E+04	8.6E+03	4.0E+04
RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)										1.6E+04	1.7E+04	1.0E+04	4.3E+04

## LAMPIRAN R

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 0,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin B (N)	Gaya Turbin C (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	4156.0	230.2	283.6	4299.0	-1072.0	377.1	2800.0	927.3	191.9	4162.4	4430.6	2949.6	11542.6
30	2063.0	-327.8	73.5	3312.0	-773.1	194.0	694.1	59.8	-5.4	2088.9	3401.0	696.7	6186.6
60	3668.0	-625.1	97.4	4016.0	-479.2	174.3	2403.0	-693.0	5.0	3720.9	4044.5	2500.9	10266.3
90	6904.0	951.9	319.3	6785.0	1267.0	255.8	7226.0	604.0	413.9	6969.3	6902.3	7251.2	21122.8
120	4095.0	-526.9	214.1	4327.0	-1816.0	282.7	2836.0	162.5	136.7	4128.8	4692.6	2840.7	11662.0
150	2376.0	-454.9	129.5	4004.0	-1143.0	287.6	578.3	47.8	3.9	2419.2	4163.9	580.3	7163.4
180	4213.0	-553.0	213.7	4890.0	-459.1	296.4	2280.0	-848.5	63.4	4249.1	4911.5	2432.8	11593.4
210	5579.0	-1017.0	452.1	5471.0	-1287.0	472.4	6146.0	-898.2	523.3	5670.9	5620.3	6211.3	17502.6
240	2941.0	-713.0	245.5	2914.0	-1677.0	296.5	2137.0	-0.2	151.5	3026.2	3362.1	2137.0	8525.3
270	1554.0	-996.7	99.3	2795.0	-1089.0	240.7	471.4	-194.9	-17.1	1846.2	2999.7	510.1	5355.9
300	3116.0	-1419.0	124.3	3179.0	-1502.0	225.9	1914.0	-1551.0	88.7	3423.9	3516.0	2463.5	9403.4
330	5274.0	-70.4	362.3	4547.0	-315.7	371.4	6251.0	-1022.0	505.2	5274.5	4557.9	6334.0	16166.4
360	4156.0	230.2	283.6	4299.0	-1072.0	377.1	2800.0	927.3	191.9	4162.4	4430.6	2949.6	11542.6
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)										3934.0	4387.2	3066.0	11387.2



## LAMPIRAN S

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 1 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin B (N.m)			Torsi Turbin A (N.m)	Torsi Turbin B (N.m)	Torsi Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	-3.0E+02	4.7E+04	-7.1E+04	9.3E+03	5.3E+04	6.5E+04	-1.2E+04	2.7E+04	3.0E+04	4.7E+04	5.3E+04	3.0E+04	1.3E+05
30	4.8E+03	2.5E+04	-3.3E+04	7.3E+03	4.0E+04	4.7E+04	-4.2E+00	8.6E+03	-7.6E+02	2.6E+04	4.1E+04	8.6E+03	7.5E+04
60	7.5E+03	4.4E+04	-5.4E+04	1.4E+03	4.9E+04	6.2E+04	7.9E+03	2.9E+04	-1.9E+04	4.4E+04	4.9E+04	3.0E+04	1.2E+05
90	7.8E+03	9.2E+04	-1.2E+05	-2.9E+03	9.0E+04	1.0E+05	-9.3E+02	8.0E+04	-8.0E+03	9.2E+04	9.0E+04	8.0E+04	2.6E+05
120	8.3E+03	4.5E+04	-6.3E+04	1.6E+04	4.6E+04	5.6E+04	-9.9E+02	3.0E+04	-7.1E+03	4.6E+04	4.9E+04	3.0E+04	1.2E+05
150	1.1E+04	3.2E+04	-4.2E+04	1.2E+04	5.2E+04	5.8E+04	1.7E+03	8.2E+03	-5.3E+03	3.3E+04	5.3E+04	8.3E+03	9.5E+04
180	1.4E+04	5.3E+04	-6.8E+04	9.2E+03	5.7E+04	6.7E+04	1.4E+04	2.5E+04	-3.8E+04	5.4E+04	5.8E+04	2.9E+04	1.4E+05
210	1.2E+04	7.3E+04	-9.3E+04	2.6E+03	7.3E+04	8.0E+04	5.1E+03	6.2E+04	-2.4E+04	7.4E+04	7.3E+04	6.3E+04	2.1E+05
240	1.1E+04	3.4E+04	-4.9E+04	1.5E+04	3.4E+04	3.6E+04	-4.3E+02	2.0E+04	-1.0E+04	3.6E+04	3.7E+04	2.0E+04	9.2E+04
270	1.1E+04	1.9E+04	-2.5E+04	1.2E+04	3.4E+04	3.8E+04	9.1E+02	7.3E+03	-2.9E+03	2.2E+04	3.6E+04	7.4E+03	6.6E+04
300	1.6E+04	3.7E+04	-4.8E+04	1.1E+04	4.2E+04	5.4E+04	1.6E+04	1.7E+04	-4.4E+04	4.1E+04	4.4E+04	2.3E+04	1.1E+05
330	7.7E+03	7.2E+04	-9.4E+04	-2.3E+03	6.9E+04	7.6E+04	2.5E+02	5.7E+04	-1.4E+04	7.3E+04	6.9E+04	5.7E+04	2.0E+05
360	-3.0E+02	4.7E+04	-7.1E+04	9.3E+03	5.3E+04	6.5E+04	-1.2E+04	2.7E+04	3.0E+04	4.7E+04	5.3E+04	3.0E+04	1.3E+05
RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)										4.9E+04	5.4E+04	3.2E+04	1.3E+05



## LAMPIRAN T

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 1 m/s

Azi muth	Turbin A (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin B (N)	Gaya Turbin C (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	13110.0	1117.0	574.1	14270.0	-2576.0	863.8	9053.0	2803.0	365.9	13157.5	14500.6	9477.0	37135.1
30	6396.0	-1038.0	141.4	9938.0	-2233.0	483.3	2247.0	-40.4	-46.1	6479.7	10185.8	2247.4	18912.8
60	11180.0	-1673.0	202.2	12190.0	-763.2	378.0	7720.0	-1854.0	-41.4	11304.5	12213.9	7939.5	31457.9
90	22050.0	-761.4	1013.0	21550.0	-631.8	889.1	22490.0	-79.7	1111.0	22063.1	21559.3	22490.1	66112.5
120	11740.0	-1645.0	345.9	11970.0	-4480.0	484.0	8557.0	-247.7	255.6	11854.7	12780.9	8560.6	33196.2
150	7920.0	-2488.0	278.7	12680.0	-3825.0	759.0	2106.0	-459.3	-61.1	8301.6	13244.4	2155.5	23701.5
180	13120.0	-2977.0	456.6	14120.0	-3311.0	826.6	7326.0	-3296.0	118.6	13453.5	14503.0	8033.3	35989.8
210	17280.0	-1420.0	1051.0	17110.0	-1300.0	911.0	18380.0	-1231.0	1350.0	17338.2	17159.3	18421.2	52918.7
240	8568.0	-2226.0	618.5	8376.0	-4424.0	684.4	6231.0	-473.2	404.7	8852.4	9472.5	6248.9	24573.9
270	4882.0	-2746.0	156.6	8460.0	-3675.0	608.8	1773.0	-275.0	-83.3	5601.3	9223.7	1794.2	16619.2
300	9720.0	-3822.0	190.0	10850.0	-3201.0	360.8	5533.0	-3790.0	207.4	10444.4	11312.3	6706.6	28463.3
330	17340.0	-490.5	1105.0	16410.0	-607.8	862.5	17660.0	-283.1	1465.0	17346.9	16421.3	17662.3	51430.5
360	13110.0	1117.0	574.1	14270.0	-2576.0	863.8	9053.0	2803.0	365.9	13157.5	14500.6	9477.0	37135.1
<b>RATA-RATA GAYA TOTAL (N)</b>										12258.1	13621.4	9324.1	35203.6

## LAMPIRAN U

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 1,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin C (N.m)			Torsi Turbin A (N.m)	Torsi Turbin B (N.m)	Torsi Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	-3.7E+03	9.6E+04	-1.4E+05	1.7E+04	1.1E+05	1.3E+05	-2.4E+04	5.9E+04	6.2E+04	9.6E+04	1.1E+05	6.4E+04	2.7E+05
30	8.9E+03	5.1E+04	-6.6E+04	1.4E+04	8.2E+04	9.6E+04	2.1E+02	1.8E+04	-1.7E+03	5.2E+04	8.3E+04	1.8E+04	1.5E+05
60	1.6E+04	8.6E+04	-1.1E+05	2.3E+03	9.6E+04	1.2E+05	1.5E+04	5.8E+04	-3.6E+04	8.7E+04	9.6E+04	5.9E+04	2.4E+05
90	1.8E+04	1.9E+05	-2.4E+05	2.9E+03	1.8E+05	2.1E+05	7.4E+02	1.7E+05	-2.1E+04	1.9E+05	1.8E+05	1.7E+05	5.4E+05
120	2.2E+04	9.2E+04	-1.3E+05	3.7E+04	9.2E+04	1.1E+05	2.7E+03	6.1E+04	-2.6E+04	9.4E+04	1.0E+05	6.1E+04	2.5E+05
150	2.4E+04	6.6E+04	-8.8E+04	2.6E+04	1.0E+05	1.2E+05	5.4E+03	1.8E+04	-1.5E+04	7.1E+04	1.1E+05	1.9E+04	2.0E+05
180	2.8E+04	1.1E+05	-1.4E+05	1.6E+04	1.2E+05	1.4E+05	3.1E+04	5.5E+04	-8.5E+04	1.1E+05	1.2E+05	6.3E+04	3.0E+05
210	2.0E+04	1.5E+05	-1.9E+05	2.5E+03	1.5E+05	1.7E+05	2.7E+03	1.3E+05	-3.0E+04	1.5E+05	1.5E+05	1.3E+05	4.3E+05
240	2.1E+04	6.8E+04	-9.7E+04	3.1E+04	7.0E+04	7.8E+04	7.8E+02	4.0E+04	-2.3E+04	7.1E+04	7.6E+04	4.0E+04	1.9E+05
270	2.0E+04	4.1E+04	-5.3E+04	2.3E+04	7.0E+04	8.0E+04	3.7E+03	1.6E+04	-1.0E+04	4.6E+04	7.4E+04	1.7E+04	1.4E+05
300	3.6E+04	7.7E+04	-9.9E+04	2.6E+04	8.5E+04	1.1E+05	2.9E+04	4.3E+04	-7.8E+04	8.5E+04	8.9E+04	5.2E+04	2.3E+05
330	1.3E+04	1.5E+05	-2.0E+05	-7.7E+02	1.5E+05	1.7E+05	-7.5E+03	1.2E+05	-4.5E+03	1.6E+05	1.5E+05	1.2E+05	4.2E+05
360	-3.7E+03	9.6E+04	-1.4E+05	1.7E+04	1.1E+05	1.3E+05	-2.4E+04	5.9E+04	6.2E+04	9.6E+04	1.1E+05	6.4E+04	2.7E+05
RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)										1.0E+05	1.1E+05	6.7E+04	2.8E+05



## LAMPIRAN V

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 1,5 m/s

Azi muth	Turbin A (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin B (N)	Gaya Turbin C (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	2.7E+04	2.8E+03	9.4E+02	2.9E+04	-4.4E+03	1.5E+03	1.9E+04	5.7E+03	5.8E+02	2.7E+04	3.0E+04	2.0E+04	7.6E+04
30	1.3E+04	-1.9E+03	2.4E+02	2.0E+04	-4.3E+03	8.9E+02	4.6E+03	-1.2E+02	-1.1E+02	1.3E+04	2.0E+04	4.6E+03	3.8E+04
60	2.2E+04	-3.5E+03	4.5E+02	2.4E+04	-1.5E+03	7.6E+02	1.6E+04	-3.5E+03	-6.2E+01	2.2E+04	2.4E+04	1.6E+04	6.2E+04
90	4.5E+04	-2.1E+03	1.9E+03	4.4E+04	-2.9E+03	1.8E+03	4.6E+04	-5.5E+02	2.1E+03	4.5E+04	4.4E+04	4.6E+04	1.3E+05
120	2.4E+04	-4.6E+03	6.6E+02	2.4E+04	-1.0E+04	9.3E+02	1.7E+04	-1.6E+03	4.8E+02	2.4E+04	2.6E+04	1.7E+04	6.7E+04
150	1.7E+04	-5.7E+03	5.0E+02	2.6E+04	-8.2E+03	1.5E+03	4.6E+03	-1.3E+03	-1.7E+02	1.8E+04	2.7E+04	4.8E+03	4.9E+04
180	2.8E+04	-6.3E+03	6.6E+02	3.0E+04	-5.7E+03	1.3E+03	1.6E+04	-7.3E+03	1.5E+02	2.8E+04	3.0E+04	1.7E+04	7.6E+04
210	3.6E+04	-2.5E+03	1.9E+03	3.5E+04	-2.4E+03	1.6E+03	3.7E+04	-9.9E+02	2.5E+03	3.6E+04	3.5E+04	3.7E+04	1.1E+05
240	1.7E+04	-4.4E+03	1.1E+03	1.8E+04	-9.1E+03	1.2E+03	1.2E+04	-1.3E+03	7.1E+02	1.8E+04	2.0E+04	1.3E+04	5.0E+04
270	1.0E+04	-5.4E+03	1.7E+02	1.7E+04	-7.1E+03	1.0E+03	3.8E+03	-9.2E+02	-1.9E+02	1.2E+04	1.9E+04	4.0E+03	3.4E+04
300	2.0E+04	-8.5E+03	3.2E+02	2.2E+04	-7.5E+03	7.0E+02	1.3E+04	-6.8E+03	2.1E+02	2.2E+04	2.3E+04	1.4E+04	5.9E+04
330	3.7E+04	-7.1E+02	2.1E+03	3.6E+04	-1.8E+03	1.7E+03	3.7E+04	1.3E+03	2.8E+03	3.7E+04	3.6E+04	3.7E+04	1.1E+05
360	2.7E+04	2.8E+03	9.4E+02	2.9E+04	-4.4E+03	1.5E+03	1.9E+04	5.7E+03	5.8E+02	2.7E+04	3.0E+04	2.0E+04	7.6E+04
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)										2.5E+04	2.8E+04	1.9E+04	7.2E+04



## LAMPIRAN W

Nilai Torsi yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 2 m/s

Azi muth	Turbin A (N.m)			Turbin B (N.m)			Turbin C (N.m)			Torsi Turbin A (N.m)	Torsi Turbin B (N.m)	Torsi Turbin C (N.m)	Torsi Total (N.m)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	-8.9E+03	1.6E+05	-2.4E+05	2.6E+04	1.8E+05	2.3E+05	-4.0E+04	1.0E+05	1.1E+05	1.6E+05	1.8E+05	1.1E+05	4.5E+05
30	1.4E+04	8.7E+04	-1.1E+05	2.4E+04	1.4E+05	1.6E+05	4.0E+02	3.1E+04	-2.6E+03	8.8E+04	1.4E+05	3.1E+04	2.6E+05
60	2.8E+04	1.4E+05	-1.8E+05	4.4E+03	1.6E+05	2.0E+05	2.4E+04	9.6E+04	-5.9E+04	1.4E+05	1.6E+05	9.9E+04	4.0E+05
90	2.7E+04	3.1E+05	-4.0E+05	8.1E+03	3.1E+05	3.5E+05	2.8E+03	2.8E+05	-3.6E+04	3.2E+05	3.1E+05	2.8E+05	9.1E+05
120	4.2E+04	1.5E+05	-2.1E+05	6.7E+04	1.6E+05	1.9E+05	8.0E+03	1.0E+05	-5.4E+04	1.6E+05	1.7E+05	1.0E+05	4.3E+05
150	4.2E+04	1.1E+05	-1.5E+05	4.5E+04	1.7E+05	2.0E+05	1.0E+04	3.2E+04	-2.7E+04	1.2E+05	1.8E+05	3.4E+04	3.4E+05
180	4.6E+04	1.9E+05	-2.4E+05	2.5E+04	2.1E+05	2.5E+05	5.5E+04	9.7E+04	-1.5E+05	1.9E+05	2.1E+05	1.1E+05	5.1E+05
210	3.3E+04	2.6E+05	-3.3E+05	9.7E+03	2.5E+05	2.8E+05	-2.2E+03	2.2E+05	-3.2E+04	2.6E+05	2.5E+05	2.2E+05	7.3E+05
240	3.5E+04	1.1E+05	-1.6E+05	5.2E+04	1.2E+05	1.3E+05	1.3E+03	6.6E+04	-3.6E+04	1.2E+05	1.3E+05	6.6E+04	3.1E+05
270	3.4E+04	7.1E+04	-9.0E+04	3.9E+04	1.2E+05	1.4E+05	8.5E+03	2.8E+04	-2.3E+04	7.8E+04	1.2E+05	2.9E+04	2.3E+05
300	5.8E+04	1.3E+05	-1.7E+05	4.7E+04	1.4E+05	1.8E+05	4.4E+04	8.0E+04	-1.2E+05	1.5E+05	1.5E+05	9.2E+04	3.9E+05
330	1.8E+04	2.7E+05	-3.5E+05	1.1E+02	2.6E+05	2.9E+05	-2.1E+04	2.1E+05	1.7E+04	2.7E+05	2.6E+05	2.1E+05	7.4E+05
360	-8.9E+03	1.6E+05	-2.4E+05	2.6E+04	1.8E+05	2.3E+05	-4.0E+04	1.0E+05	1.1E+05	1.6E+05	1.8E+05	1.1E+05	4.5E+05
RATA-RATA TOTAL TORSI (N.m)										1.7E+05	1.9E+05	1.2E+05	4.7E+05

## LAMPIRAN X

Nilai Gaya yang dihasilkan oleh *Array II* pada kecepatan arus 2 m/s

Azi muth	Turbin A (N)			Turbin B (N)			Turbin C (N)			Gaya Turbin A (N)	Gaya Turbin B (N)	Gaya Turbin C (N)	Gaya Total (N)
	x	y	z	x	y	z	x	y	z				
0	4.5E+04	5.2E+03	1.4E+03	4.9E+04	-6.4E+03	2.2E+03	3.2E+04	9.6E+03	8.2E+02	4.5E+04	5.0E+04	3.3E+04	1.3E+05
30	2.2E+04	-3.1E+03	3.5E+02	3.4E+04	-6.9E+03	1.4E+03	7.9E+03	-1.9E+02	-1.9E+02	2.2E+04	3.4E+04	7.9E+03	6.4E+04
60	3.6E+04	-6.0E+03	8.3E+02	4.0E+04	-2.8E+03	1.3E+03	2.6E+04	-5.7E+03	-6.5E+01	3.7E+04	4.0E+04	2.7E+04	1.0E+05
90	7.5E+04	-2.8E+03	3.1E+03	7.4E+04	-5.0E+03	2.8E+03	7.7E+04	-9.8E+02	3.3E+03	7.5E+04	7.4E+04	7.7E+04	2.3E+05
120	4.0E+04	-9.0E+03	1.2E+03	4.0E+04	-1.8E+04	1.6E+03	2.9E+04	-3.5E+03	8.0E+02	4.1E+04	4.4E+04	2.9E+04	1.1E+05
150	2.8E+04	-1.0E+04	7.6E+02	4.3E+04	-1.4E+04	2.4E+03	7.9E+03	-2.4E+03	-3.2E+02	3.0E+04	4.5E+04	8.3E+03	8.4E+04
180	4.7E+04	-1.1E+04	8.8E+02	5.1E+04	-8.8E+03	1.9E+03	2.7E+04	-1.3E+04	1.6E+02	4.9E+04	5.2E+04	3.0E+04	1.3E+05
210	6.1E+04	-4.4E+03	3.1E+03	6.0E+04	-5.5E+03	2.6E+03	6.4E+04	-2.0E+02	3.9E+03	6.1E+04	6.0E+04	6.4E+04	1.8E+05
240	2.9E+04	-7.3E+03	1.7E+03	3.0E+04	-1.5E+04	1.9E+03	2.1E+04	-2.1E+03	1.0E+03	3.0E+04	3.3E+04	2.1E+04	8.4E+04
270	1.8E+04	-9.0E+03	2.2E+02	2.9E+04	-1.2E+04	1.6E+03	6.6E+03	-2.0E+03	-3.1E+02	2.0E+04	3.2E+04	6.9E+03	5.8E+04
300	3.5E+04	-1.4E+04	4.3E+02	3.7E+04	-1.3E+04	1.1E+03	2.3E+04	-1.1E+04	1.5E+02	3.7E+04	3.9E+04	2.5E+04	1.0E+05
330	6.5E+04	-5.8E+02	3.3E+03	6.2E+04	-3.3E+03	2.7E+03	6.3E+04	4.1E+03	4.4E+03	6.5E+04	6.3E+04	6.3E+04	1.9E+05
360	4.5E+04	5.2E+03	1.4E+03	4.9E+04	-6.4E+03	2.2E+03	3.2E+04	9.6E+03	8.2E+02	4.5E+04	5.0E+04	3.3E+04	1.3E+05
RATA-RATA GAYA TOTAL (N)										4.3E+04	4.7E+04	3.3E+04	1.2E+05